

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Aplicação do método Monte Carlo na estimativa das necessidades nominais  
de energia útil para aquecimento e arrefecimento de um parque residencial**

**João Pedro Coelho do Carmo**

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

**2014**



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Aplicação do método Monte Carlo na estimativa das necessidades nominais  
de energia útil para aquecimento e arrefecimento de um parque residencial**

**João Pedro Coelho do Carmo**

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de  
Professora Doutora Marta João Nunes Oliveira Panão (FCUL)

**2014**



## **Agradecimentos**

Aproveito este espaço para agradecer à Professora Doutora Marta Oliveira, minha orientadora de dissertação, por se ter disposto a conceder-me esta oportunidade de realizar este trabalho, pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e também pela paciência ao longo desta jornada

Gostaria também de agradecer aos amigos e colegas pelo apoio e interesse demonstrado, por mais pequeno que seja, oferecendo uma companhia inestimável ao longo da realização do trabalho.

Por fim, mas não por último, gostaria também de mostrar o meu profundo agradecimento à minha família pelo apoio demonstrado nos momentos altos e baixos desta jornada, principalmente, ao meu pai pela paciência e ao mesmo tempo tenacidade com que me apoiou e ajudou ao longo deste trabalho.



## **Abstract**

The energy consumption's current context associated with residential buildings, which average value contributes substantially for the increase of the national energy consumption, comprising about 17% of its total value, makes the rational and efficient use of energy imperative. For this sector it was recently sanctioned and published the Energy Performance of the Residential Buildings' Regulation (REH), which establishes a methodology that allows determining the nominal values of the useful energy used for heating and cooling in housing. In order to appropriately regulate this energy needs it is necessary to typify them accordingly to certain parameters and suitable tools. For that, it's proposed in this dissertation the use of the Monte Carlo method in order to determine the average value of the mentioned needs.

In this sense, a Monte Carlo simulation was made which output is comprised by a probabilistic distribution of the useful energy's nominal needs for heating and cooling and the input by several normal distributions related to characteristic parameters of the Portuguese climate and housing. However, applying the input such as explained by the regulation is unorthodox, complex and needs several parameters to be differentiated. In that regard, to make its usage more practical, simplifications and conditions were applied to the simulation.

The average values of the useful energy's nominal needs obtained by the simulation reveal some precision, since in the heating its value is practically equal to that of real cases, however, its value in the cooling season shows some difference towards real cases, albeit acceptable. That said, it's credible that the proposed method in this dissertation would be considered acceptable and viable, given that the process of typifying the consumption become sustainable and doesn't even misrepresent the wanted results, to a certain degree. It is hereby noted the need to optimize the algorithm so that this imprecisions may be mitigated.

**Keywords:** Energy consumption, residential building, Monte Carlo method, REH, Energy simulation.





## Resumo

O atual contexto do consumo energético associado aos edifícios do parque residencial, cujo valor médio contribui substancialmente para o aumento do consumo energético nacional, com 17% do valor total da energia primária consumida, torna imperativo o uso racional e eficiente da energia neste âmbito. Para este setor foi recentemente aprovado e publicado o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), o qual preconiza uma metodologia que permite determinar valores nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento de habitações. De modo a regular adequadamente estas necessidades energéticas é necessário tipificá-las dentro de determinados parâmetros e através de ferramentas apropriadas. Para tal efeito, é proposta na presente dissertação a utilização do método de Monte Carlo para determinar os parâmetros estatísticos necessários para caracterizar as necessidades de energia de um conjunto de habitações.

Nesse sentido, foi realizada uma simulação Monte Carlo cujo *output* consiste numa distribuição probabilística das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e o *input* em várias distribuições normais de parâmetros característicos do clima e parque edificado de Portugal. No entanto, introduzir o *input* tal como o explicado pelo regulamento é pouco prático, complexo e com muitos parâmetros que necessitam de ser simplificados. Desta maneira, para usar esta metodologia de modo prático foram aplicadas na simulação simplificações e novas condições.

Os valores médios das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento obtidas pela simulação são relativamente precisos face aos valores verificados em casos reais, sendo que no caso da estação de arrefecimento existe uma diferença que é considerada aceitável, mas na estação de aquecimento os resultados são bastante precisos. Dito isto, é credível que a metodologia proposta na presente dissertação se revele aceitável e viável, já que torna o processo de tipificação de consumos mais sustentável e, até certo ponto, não desvirtua os resultados pretendidos. Fica então a necessidade de otimizar o algoritmo para que esta imprecisão seja mitigada.

**Palavras-chave:** Consumo energético, edifício habitacional, método Monte Carlo, REH, simulação energética



# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1	Contexto .....	1
1.2	Objetivos e Estrutura.....	5
2.	Evolução consumo energético do parque residencial em Portugal .....	7
3.	Caracterização do clima e do parque residencial de Portugal .....	11
3.1	Caracterização do clima português.....	11
3.2	Caracterização do parque residencial português .....	13
4.	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.....	21
4.1	Cálculo dos índices de consumo energético presente no REH.....	21
4.1.1	Método de cálculo das necessidades de aquecimento .....	21
4.1.2	Método de cálculo das necessidades de arrefecimento .....	25
4.2	Valor limite das necessidades nominais .....	28
4.2.1	Valor limite das necessidades de aquecimento .....	28
4.2.2	Valor limite das necessidades de arrefecimento.....	29
5.	Simulação de Monte Carlo .....	30
5.1	Método de Monte Carlo .....	30
5.2	Etapas da simulação .....	32
5.3	Distribuição probabilística das variáveis.....	32
5.4	Algoritmo do REH .....	33
5.4.1	Número de fachadas e sua orientação .....	34
5.4.2	Área de pavimento, número de pisos e área de cobertura .....	35
5.4.3	Dimensões das fachadas.....	35
5.4.4	Coeficiente global de transferências de calor.....	36
5.4.5	Perdas de calor na estação de aquecimento.....	37
5.4.6	Perdas de calor na estação de arrefecimento .....	38
5.4.7	Ganhos de fontes internas .....	38

5.4.8	Ganhos solares na estação de aquecimento .....	38
5.4.9	Ganhos solares na estação de arrefecimento .....	39
5.4.10	Limites dos parâmetros gerados .....	40
5.4.11	Perdas de calor por transmissão de referência.....	40
5.5	Variáveis de entrada .....	41
5.5.1	Parâmetros característicos do clima em território nacional .....	41
5.5.2	Parâmetros característicos do parque residencial .....	42
6.	Resultados.....	44
6.1	Variáveis de entrada .....	44
6.1.1	Parâmetros característicos do clima em território nacional .....	44
6.1.2	Parâmetros característicos do parque residencial .....	48
6.2	Variáveis de saída.....	49
6.2.1	Estação de aquecimento.....	50
6.2.2	Estação de arrefecimento.....	51
7.	Discussão .....	53
7.1	Parâmetros de <i>input</i> .....	53
7.2	Parâmetros de <i>output</i> .....	54
8.	Conclusão .....	61
9.	Referências .....	64
ANEXO A – Variáveis de entrada .....		A-1
ANEXO B – Fatores dos ganhos solares.....		B-1
Fator de obstrução do vão envidraçado .....		B-1
Fator de sombreamento do horizonte por obstrução da radiação solar.....		B-1
Fator de sombreamento por elementos horizontais e verticais .....		B-2
Fração envidraçada.....		B-4
Fator solar de vãos envidraçados.....		B-4
ANEXO C – Distribuições de frequência.....		C-1
Distribuições de frequências das variáveis de entrada das características do clima.....		C-1
Distribuições de frequências das variáveis de entrada das características do parque residencial....		C-8

Distribuições de frequências das variáveis de saída da estação de aquecimento .....	C-10
Distribuições de frequências das variáveis de saída da estação de arrefecimento .....	C-13
Distribuições de frequências das variáveis de saída de casos reais.....	C-15



## Índice de figuras

Figura 1 - Temperatura média anual (fonte: IPMA). .....	11
Figura 2 - Clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Koppen (fonte: IPMA). .....	12
Figura 3 - Um modelo determinístico que usa variáveis de <i>input</i> para gerar variáveis de <i>output</i> . .....	30
Figura 4 - Esquema representativo de um sistema estocástico. ....	30
Figura 5 - Diagrama da distribuição normal .....	33
Figura 6 - Esquema da orientação das 4 fachadas de um edifício com o fator igual a 0. ....	34
Figura 7 - Esquema da orientação das 4 fachadas de um edifício com o fator igual a 1. ....	34
Figura 8 - Forma do piso antes e depois do ajuste com um fator geométrico menor que 1. ....	36
Figura 9 - Forma do piso antes e depois do ajuste com um fator geométrico maior que 1. ....	36





## Índice de gráficos

Gráfico 1 - Consumo energético mundial, em TWh, por fonte (fonte: AIE, <i>International Energy Outlook 2013</i> ).....	1
Gráfico 2 - Consumo energético mundial, em TWh, por fonte, em 1990 (fonte: AIE, <i>International Energy Outlook 2013</i> ). ....	2
Gráfico 3 - Consumo energético mundial, em TWh, por fonte, em 2010 (fonte: AIE, <i>International Energy Outlook 2013</i> ). ....	2
Gráfico 4 - Produção mundial de eletricidade, em TWh, por fonte renovável, em 2011 (fonte: <i>World Energy Outlook 2013</i> , IEA) .....	3
Gráfico 5 - Levelized cost of energy (LCOE), por fonte, em €/kWh (fonte: OpenEL Transparent Cost Database).....	4
Gráfico 6 - Evolução do consumo de energia primária em Portugal, por fonte, em ktep, entre 2000 e 2011 (fonte: Desdobrável 2000-2011 - DGEG) .....	7
Gráfico 7 - Evolução do consumo de energia final por fonte, em ktep, desde 2000 até 2011 (fonte: Desdobrável 2000-2011 (DGEG)). ....	7
Gráfico 8 - Distribuição do consumo de energia final por fonte para 2000 (fonte: Desdobrável 2000-2011 (DGEG))......	8
Gráfico 9 - Distribuição do consumo de energia final por fonte para 2011 (fonte: Desdobrável 2000-2011 (DGEG))......	8
Gráfico 10 - Distribuição do consumo por setor de 2011 (fonte: Balanço Energético 2011 (DGEG)). ..	9
Gráfico 11 - Evolução do consumo no setor doméstico, em tep, e o seu peso no consumo final total, em %, entre 1998 e 2011 (fonte: Balanço Energético (DGEG)). ....	9
Gráfico 12 - Distribuição do consumo energético nos alojamentos por tipo de utilização [fonte: ICESD 2010 (INE e DGEG)]. ....	10
Gráfico 13 - Número de edifícios de habitação por região de Portugal (fonte:INE, Censos 2011). .....	14
Gráfico 14 - Número de edifícios de habitação segundo a época de construção (fonte: INE, Censos 2011). ....	14
Gráfico 15 - Edifícios por região e por época de construção (fonte: INE, Censos 2011). ....	15
Gráfico 16 - Número de edifícios segundo o número de pisos do edifício (fonte: INE, Censos 2011). ..	15
Gráfico 17 - Distribuição de edifícios segundo o número de pisos do edifício (fonte: INE, Censos 2011). ....	16
Gráfico 18 - Número de edifícios segundo o número de alojamentos (fonte: INE, Censos 2011). .....	16
Gráfico 19 - Número de edifícios segundo a estrutura de construção (fonte: INE, Censos 2011).....	17

Gráfico 20 - Distribuição de edifícios segundo o tipo de estrutura construção, por época de construção do edifício (fonte: INE, Censos 2011).....	17
Gráfico 21 - Número de edifícios segundo o revestimento exterior das paredes (fonte: INE, Censos 2011).....	18
Gráfico 22 - Distribuição dos edifícios segundo o tipo de revestimento exterior das paredes, por época de construção do edifício (fonte: INE, Censos 2011).....	18
Gráfico 23 - Número de edifícios segundo o tipo de cobertura (fonte: INE, Censos 2011).....	19
Gráfico 24 - Distribuição de edifícios segundo o tipo de cobertura, por época de construção do edifício (fonte: INE, Censos 2011).....	19
Gráfico 25 - Histograma com os valores de graus-dias gerados.....	44
Gráfico 26 - Histograma com os valores gerados da duração da estação de aquecimento.....	44
Gráfico 27 - Histograma com os valores gerados da energia sola média incidente numa superfície orientada a sul.....	45
Gráfico 28 - Histograma com os valores gerados da temperatura média exterior, durante a estação de arrefecimento.....	45
Gráfico 29 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa cobertura. ....	45
Gráfico 30 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Norte.....	46
Gráfico 31 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Nordeste.....	46
Gráfico 32 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Este.....	46
Gráfico 33 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Sudeste.....	47
Gráfico 34 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Sul.....	47
Gráfico 35 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Sudoeste.....	47
Gráfico 36 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Oeste.....	48
Gráfico 37 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Noroeste.....	48
Gráfico 38 - Histograma com os valores gerados da área de pavimento útil em m <sup>2</sup> . ....	48
Gráfico 39 - Histograma com os valores gerados do coeficiente global de transferência de calor. ....	49
Gráfico 40 - Histograma com os valores gerados de pé direito médio da habitação.....	49
Gráfico 41 - Histograma com os valores calculados das perdas de calor na estação de aquecimento. .	50
Gráfico 42 - Histograma com os valores calculados dos ganhos de calor na estação de aquecimento.	50

Gráfico 43 - Histograma com os valores calculados das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento. ....	50
Gráfico 44 - Histograma com os valores obtidos do limite anual das necessidades nominais de energia útil para aquecimento. ....	51
Gráfico 45 - Histograma com os valores calculados das perdas de calor na estação de arrefecimento. ....	51
Gráfico 46 - Histograma com os valores calculados dos ganhos de calor na estação de arrefecimento. ....	51
Gráfico 47 - Histograma com os valores calculados das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento. ....	52
Gráfico 48 - Histograma com os valores calculados do limite das necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento. ....	52
Gráfico 49 - Resultado das perdas e ganhos de calor para as estações de aquecimento e arrefecimento (kWh). ....	55
Gráfico 50 - Resultados das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e os respetivos valores limites (kWh). ....	55
Gráfico 51 - Histograma com os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento de casos reais. ....	58
Gráfico 52 - Histograma com os valores máximos das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento de casos reais. ....	58
Gráfico 53 - Histograma com os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento de casos reais. ....	59
Gráfico 54 - Histograma com os valores máximos das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento de casos reais. ....	59
Gráfico 55 - Histograma com os valores calculados das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento para 100 iterações. ....	60



## Índice de tabelas

Tabela 1 - Critérios para a determinação da zona climática de inverno (fonte: REH).....	13
Tabela 2 - Critérios para a determinação da zona climática de verão (fonte: REH). ....	13
Tabela 3 - Valores limite de área de pavimento, em $m^2$ , para cada número de pisos, por alojamento. ....	35
Tabela 4 – Média do fator de obstrução de vãos envidraçados da estação de aquecimento, por orientação. ....	39
Tabela 5 - Média do fator solar e do fator de obstrução de vãos envidraçados da estação de arrefecimento, por orientação.....	39
Tabela 6 - Média e desvio padrão de alguns parâmetros característicos do clima em território nacional. Os valores destes parâmetros para cada região podem ser consultados na Tabela 16 e na Tabela 17 do ANEXO A.....	42
Tabela 7 - Média e desvio padrão da intensidade da radiação incidente para cada orientação. Os valores de cada região podem ser consultados na Tabela 17 do ANEXO A. ....	42
Tabela 8 - Média e desvio padrão de certos parâmetros. Os valores de cada caso podem ser consultados na Tabela 18 do ANEXO A. ....	43
Tabela 9 - Valor médio de $A_w/A_f$ para cada orientação. Os valores de cada caso de orientação podem ser consultados na Tabela 21 do ANEXO A.....	43
Tabela 10 - Média dos parâmetros gerados.....	53
Tabela 11 - Média dos valores gerados da intensidade da radiação incidente para cada orientação. ....	53
Tabela 12 - Média dos parâmetros <i>output</i> . ....	54
Tabela 13 - Frequência relativa em percentagem dos valores do $N_{ic}$ . ....	56
Tabela 14 - Frequência relativa em percentagem dos valores do $N_{vc}$ . ....	56
Tabela 15 - Média e desvio padrão das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento resultantes da simulação de dados recolhidos a partir de casos reais.....	57
Tabela 16 - Valores de referência para a estação de aquecimento (fonte: REH). ....	A-1
Tabela 17 - Valores de referência para o período de arrefecimento (fonte: REH).....	A-2
Tabela 18 - Valores reais da área de pavimento útil, do coeficiente de transferência de calor e do pé direito médio de casos típicos de habitações portuguesas (fonte: Panão, M., Rebelo, M., Camelo, S., 2013). ....	A-3
Tabela 19 - Área de fachada ( $A_f$ ), em $m^2$ , por orientação dos casos em estudo (fonte: Gonçalves, Camelo et al. 2005). ....	A-3
Tabela 20 - Área do vão envidraçado ( $A_w$ ), em $m^2$ , por orientação dos casos em estudo (fonte: Gonçalves, Camelo et al. 2005). ....	A-3

Tabela 21 - Rácio entre a área do v��o envidraçado e a área da fachada ( $A_w/A_f$ ) por orientação para os casos em estudo (fonte: Gonçalves, Camelo et al. 2005). ....	A-4
Tabela 22 - Fator de orientação $X_j$ (fonte: REH).....	A-4
Tabela 23 - Coeficientes de transmissão térmica superf��ciais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, $U_{ref}$ [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ] (fonte:REH).....	A-5
Tabela 24 - Coeficientes de transmissão térmica lineares de referência, $\psi_{ref}$ [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ] (fonte: REH). ....	A-6
Tabela 25 - Coeficiente de absorção da radiação solar, $\alpha$ (fonte: REH).....	A-6
Tabela 26 - Valores do fator de sombreamento do horizonte $F_h$ na estação de aquecimento (fonte: REH).....	B-2
Tabela 27 - Valores dos fatores de sombreamento dos elementos horizontais $F_o$ na estação de aquecimento (fonte: REH).....	B-2
Tabela 28 - Valores dos fatores de sombreamento dos elementos horizontais $F_o$ na estação de aquecimento (fonte: REH).....	B-3
Tabela 29 - Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais $F_f$ na estação de aquecimento (fonte: REH). ....	B-3
Tabela 30 - Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais $F_f$ na estação de arrefecimento (fonte: REH).....	B-3
Tabela 31 - Fração envidraçada (fonte: REH).....	B-4
Tabela 32 - Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao v��o, $g \perp, v_i$ (fonte: REH).....	B-5
Tabela 33 - Fração de tempo em que os dispositivos móveis se encontram ativados $Fmv$ . (fonte: REH).....	B-6
Tabela 34 - Fator de correção da seletividade angular dos envidraçado na estação de arrefecimento, $Fw, v$ (fonte: REH).....	B-6
Tabela 35 - Valores correntes do fator solar dos vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar $gTvc$ (fonte: REH). ....	B-7
Tabela 36 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da duração da estação de aquecimento.....	C-1
Tabela 37 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do número de graus dias. ....	C-1
Tabela 38 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar mensal incidente numa superfície orientada a sul.....	C-2
Tabela 39 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da temperatura exterior média durante a estação de arrefecimento. ....	C-2
Tabela 40 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa cobertura. ....	C-3
Tabela 41 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Norte.....	C-4

Tabela 42 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Nordeste. ....	C-4
Tabela 43 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Este. ....	C-5
Tabela 44 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Sudeste. ....	C-5
Tabela 45 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Sul. ....	C-6
Tabela 46 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Sudoeste. ....	C-6
Tabela 47 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Oeste. ....	C-7
Tabela 48 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Noroeste. ....	C-7
Tabela 49 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da área de pavimento útil. ....	C-8
Tabela 50 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do pé direito médio da habitação. ....	C-8
Tabela 51 - - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do coeficiente global de transferência de calor. ....	C-9
Tabela 52 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das perdas de calor na estação de aquecimento. ....	C-10
Tabela 53 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos ganhos de calor na estação de aquecimento. ....	C-11
Tabela 54 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para aquecimento. ....	C-11
Tabela 55 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do valor limite das necessidades de energia útil para aquecimento. ....	C-12
Tabela 56 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das perdas de calor na estação de arrefecimento. ....	C-13
Tabela 57 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos ganhos de calor na estação de arrefecimento. ....	C-13
Tabela 58 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento. ....	C-14
Tabela 59 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do valor limite das necessidades de energia útil para arrefecimento. ....	C-14
Tabela 60 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para aquecimento de casos reais. ....	C-15

Tabela 61 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos valores limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento de casos reais.....	C-15
Tabela 62 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de casos reais. ....	C-16
Tabela 63 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos valores limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de casos reais. ....	C-16



## Lista da símbolos

$a$	Inércia térmica do edifício	[-]
$A$	Área de um elemento da envolvente	[m <sup>2</sup> ]
$A_{op}$	Área do elemento da envolvente opaca	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Área de pavimento útil	[m <sup>2</sup> ]
$A_{p,piso}$	Área de pavimento útil por piso	[m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Área efetiva coletora de radiação solar	[m <sup>2</sup> ]
$A_w$	Área total do vão envidraçado	[m <sup>2</sup> ]
$B$	Desenvolvimento linear da ponte térmica linear	[m]
$b_{tr}$	Coefficiente de perdas de um espaço não útil ou de um edifício adjacente	[-]
$b_{ve}$	Fator de correção da temperatura de um sistema de recuperação de calor	[-]
$F_f$	Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado	[-]
$F_g$	Fração envidraçada do vão envidraçado	[-]
$F_{geo}$	Fator geométrico	[-]
$F_h$	Fator de sombreamento do horizonte por obstruções exteriores ao edifício	[-]
$F_{mv}$	Fração de tempo em que os dispositivos de proteção solar móveis estão ativos	[-]
$F_o$	Fator de sombreamento por elementos horizontais adjacentes ao envidraçado	[-]
$F_s$	Fator de obstrução do vão envidraçado para a estação de aquecimento	[-]
$F_s$	Fator de obstrução para a estação de arrefecimento	[-]
$F_w$	Fator de seletividade angular para a estação de aquecimento	[-]
$F_{wv}$	Fator de seletividade angular para a estação de arrefecimento	[-]
$GD$	Número de graus-dias	[°C.dias]
$g_i$	Fator solar da radiação incidente na estação de aquecimento	[-]
$G_{sul}$	Energia solar média incidente numa superfície orientada a sul na estação de aquecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .mês)]
$g_T$	Fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar ativados	[-]
$g_{Tp}$	Fator solar global do envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar existentes	[-]
$g_{\perp vi}$	Fator solar do vidro para uma incidência normal	[-]
$g_v$	Fator solar do vão envidraçado para a estação de arrefecimento	[-]
$g_{v,ref}$	Fator solar do vão envidraçado de referencia para a estação de arrefecimento	[-]
$\hat{H}_T$	Coefficiente global de transferência de calor por unidade de área	[W/(°C.m <sup>2</sup> )]
$H_{adj}$	Transferência de calor através de elementos em contato com edifícios adjacentes	[W/°C]
$H_{ecs}$	Transferência de calor através de elementos em contato com o solo	[W/°C]
$H_{enu}$	Transferência de calor através de elementos em contato com espaços não úteis	[W/°C]
$H_{ext}$	Transferência de calor através de elementos da envolvente em contato com o exterior	[W/°C]
$H_{tr}$	Coefficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento	[W/°C]
$I_{sol}$	Energia solar incidente nos envidraçados por cada orientação	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$I_{sol,ref}$	Energia solar média de referência incidente numa superfície orientada a oeste	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$l_{13}$	Comprimento do par de fachadas opostas 1 e 3	[m]
$l_{24}$	Comprimento do par de fachadas opostas 2 e 4	[m]
$L_v$	Duração da estação de arrefecimento	[h]
$I$	Duração da estação de aquecimento	[meses]
$N_i$	Valor máximo das necessidades nominais de aquecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]

$N_{ic}$	Necessidades nominais de aquecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
$N_v$	Valor máximo das necessidades nominais de arrefecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
$N_{vc}$	Necessidades nominais de arrefecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
$P$	Desenvolvimento total de uma parede em contato com o solo	[m]
$P_d$	Pé direito médio	[m]
$Q_{g,i}$	Ganhos de calor brutos	[kWh]
$Q_{gu,i}$	Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento	[kWh]
$Q_{gu,i,ref}$	Ganhos térmicos de referência na estação de aquecimento	[kWh]
$Q_{g,v}$	Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento	[kWh]
$Q_{g,v,ref}$	Ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento	[kWh]
$q_{int}$	Ganhos internos médios numa base de vinte e quatro horas por dia por unidade de superfície	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_{int,i}$	Ganhos de calor de fontes internas na estação de aquecimento	[kWh]
$Q_{int,v}$	Ganhos térmicos de fontes internas de calor na estação de arrefecimento	[kWh]
$Q_{p,v}$	Perdas de calor na estação de arrefecimento	[kWh]
$Q_{sol,i}$	Ganhos solares	[kWh]
$Q_{sol,v}$	Ganhos solares na estação de arrefecimento	[kWh]
$Q_{tr,i}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de aquecimento	[kWh]
$Q_{tr,i,ref}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente de referência	[kWh]
$Q_{ve,i}$	Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento	[kWh]
$Q_{ve,i,ref}$	Transferência de calor por ventilação de referência na estação de aquecimento	[kWh]
$R_{ph}$	Taxa nominal de renovação de ar interior	[h <sup>-1</sup> ]
$R_{ph,ref}$	Taxa de renovação de ar de referência	[h <sup>-1</sup> ]
$R_{se}$	Resistência térmica superficial exterior	[m <sup>2</sup> .°C/W]
$U$	Coeficiente de transmissão térmica	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$U_{bf}$	Coeficiente de transmissão térmica de um pavimento enterrado	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$U_{bw}$	Coeficiente de transmissão térmica de uma parede em contato com o solo	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$U_{ref}$	Coeficiente de transmissão térmica superficial de referência	[W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$\dot{V}_{ins}$	Caudal de ar médio insuflado	[m <sup>3</sup> /h]
$X_j$	Fator de orientação	[-]
$Z$	Profundidade média enterrada de uma parede em contato com o solo	[m]
$\alpha$	Coeficiente de absorção de radiação solar por uma superfície opaca	[-]
$\eta_i$	Fator de utilização dos ganhos de calor na estação de aquecimento	[-]
$\eta_v$	Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento	[-]
$\eta_{rc}$	Rendimento de um sistema de recuperação de calor	[-]
$\eta_{i,ref}$	Fator de utilização dos ganhos térmicos de referência na estação de aquecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
$\eta_{v,ref}$	Fator de utilização de ganhos de referência da estação de arrefecimento	[kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
$\theta_{v,ext}$	Temperatura média exterior na estação de arrefecimento	[°C]
$\theta_{v,ref}$	Temperatura de referência na estação de arrefecimento	[°C]
$\psi_j$	Coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear	[W/(m.°C)]
$\gamma$	Razão entre os ganhos térmicos brutos e a perdas térmicas do edifício	[-]
$\psi_{ref}$	Coeficiente de transmissão térmica linear de referência	[W/(m.°C)]

## 1. Introdução

### 1.1 Contexto

No atual cenário do desenvolvimento económico mundial, a necessidade de crescimento económico sustentável tem surgido como um fator chave na aplicação das políticas económicas. Nesse sentido, os governos dos vários Estados fomentam o desenvolvimento humano ao mesmo tempo que tentam assegurar a sustentabilidade do ambiente e dos sistemas naturais, salvaguardando as necessidades não só das gerações atuais mas também das gerações vindouras.

O maior obstáculo neste contexto reside numa realidade incontornável que alia o desenvolvimento do nível de vida das populações ao aumento do consumo de energia, situação que, ao atual ritmo de crescimento, causa alarme não só a nível ambiental mas também a nível de abastecimento energético.

A nível ambiental, a preocupação está focada no uso excessivo dos combustíveis fósseis que é o principal responsável pela emissão dos gases de efeito de estufa, sabendo que a industrialização rápida dos países emergentes tem vindo a aumentar o consumo deste recurso a um ritmo alarmante, como se pode verificar no Gráfico 1. Este facto põe em causa o abastecimento de energia necessário para responder a tal tendência de crescimento, tendo em conta que o combustível fóssil é um recurso que se encontra potencialmente próximo da depleção.

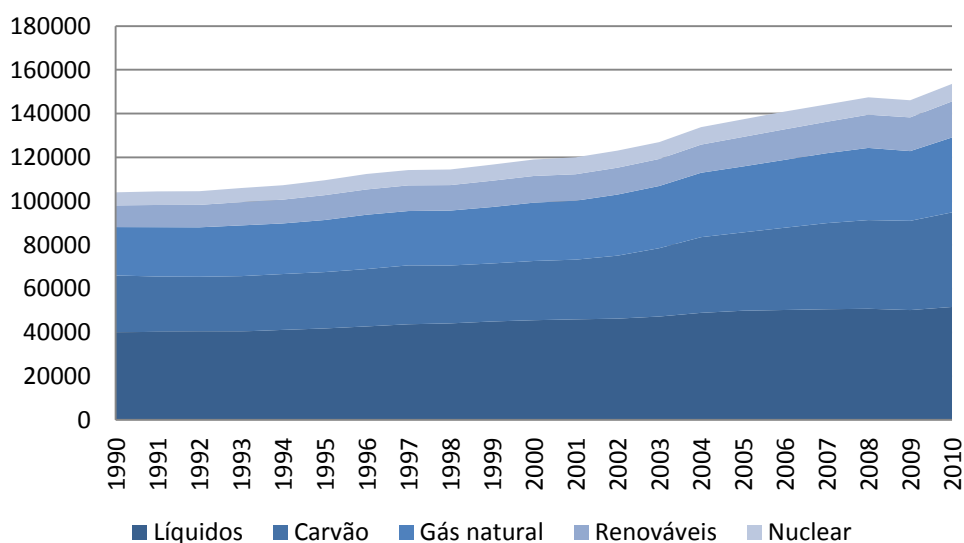


Gráfico 1 - Consumo energético mundial, em TWh, por fonte (fonte: AIE, *International Energy Outlook 2013*).

O Gráfico 1 retrata a evolução do consumo energético mundial por fonte e é possível verificar que não só o consumo total aumentou, mas que também o consumo absoluto associado a todas as fontes aumentou. O consumo associado a combustíveis fósseis líquidos teve o menor aumento, sendo que esse incremento ficou contabilizado em 29%, entre 1990 e 2010, e o consumo associado as fontes renováveis teve o maior aumento no mesmo período, contabilizado em 66%. Apesar de o consumo absoluto associado a todas as fontes ter aumentado, o peso no consumo total dos combustíveis líquidos e da energia nuclear diminuiu de 38% para 34 % e de 6% para 5%, respetivamente. O carvão, que viu

o seu peso aumentar de 25% para 28%, teve o maior aumento na contribuição do consumo total. A evolução do peso de cada fonte no consumo final pode ser observada comparando o Gráfico 2 com o Gráfico 3.

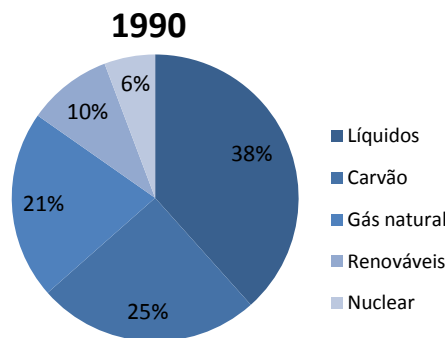


Gráfico 2 - Consumo energético mundial, em TWh, por fonte, em 1990 (fonte: AIE, *International Energy Outlook 2013*).

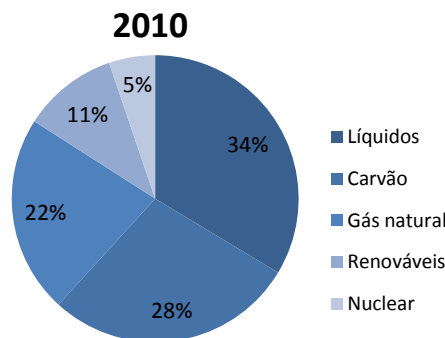


Gráfico 3 - Consumo energético mundial, em TWh, por fonte, em 2010 (fonte: AIE, *International Energy Outlook 2013*).

O aumento do consumo final verificado no Gráfico 1 evidencia a crescente preocupação com a necessidade de melhorar o abastecimento energético, mas também a necessidade de procurar alternativas aos combustíveis fósseis, os quais também tiveram um aumento considerável, em termos absolutos.

A substituição do uso de combustíveis fósseis por fontes de energia renovável tem sido uma solução que reúne grande consenso e sustentabilidade, não só na perspetiva da resolução do problema da depleção de recursos naturais, mas também no tocante à redução da emissão dos gases de efeito de estufa. A principal aplicação das energias renováveis consiste na produção de energia elétrica através de vários tipos de fontes. O uso da energia eólica, da energia hídrica e da bioenergia, são as formas de aproveitamento renovável mais comuns para a produção de energia elétrica, conforme elucida o Gráfico 4.

As formas de aproveitamento mencionadas contabilizam cerca de 97% da produção de energia elétrica por fontes renováveis. A contribuição da energia solar fotovoltaica não é tão grande como se esperaria porque o seu uso concentra-se na produção descentralizada de energia elétrica para habitações, ao

passo que o uso de energia geotérmica depende em muito da geografia e geologia do local de aproveitamento.

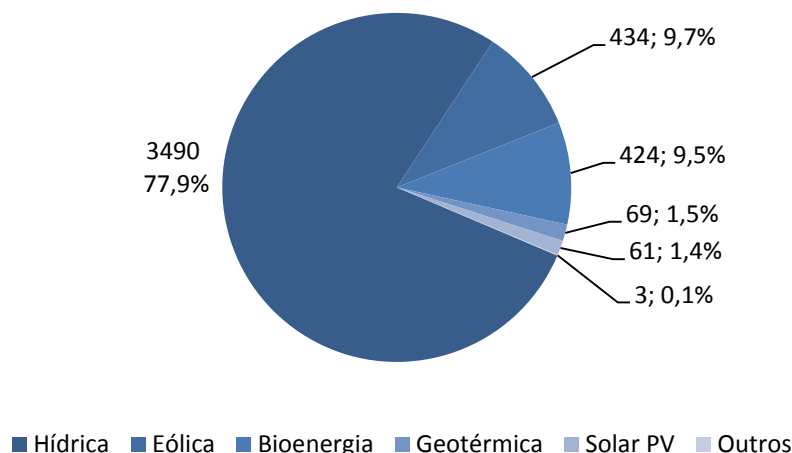


Gráfico 4 - Produção mundial de eletricidade, em TWh, por fonte renovável, em 2011 (fonte: *World Energy Outlook 2013*, IEA)

Porém, as soluções apontadas, só por si, não resolvem o problema das elevadas necessidades de abastecimento energético. Mesmo que seja possível substituir completamente os combustíveis fósseis para a produção de energia por fontes alternativas, o crescimento da necessidade e do consumo energético mantém-se. A agravar esta realidade, verifica-se que as tecnologias de aproveitamento de energia renovável ainda são caras quando comparadas com as tecnologias que usam os combustíveis fósseis, como se verifica no Gráfico 5. No Gráfico 5 é possível observar o custo médio actualizado de energia (Levelized Cost of Energy, LCOE) de cada fonte produtora de energia elétrica e também possível verificar que quer o carvão quer o ciclo combinado de gás natural possuem um LCOE bastante inferior a qualquer outra alternativa. Por consequência, os problemas inerentes ao abastecimento energético revelam outra dimensão: a facilidade de acesso à energia e a consequente necessidade de gestão dos consumos energéticos.

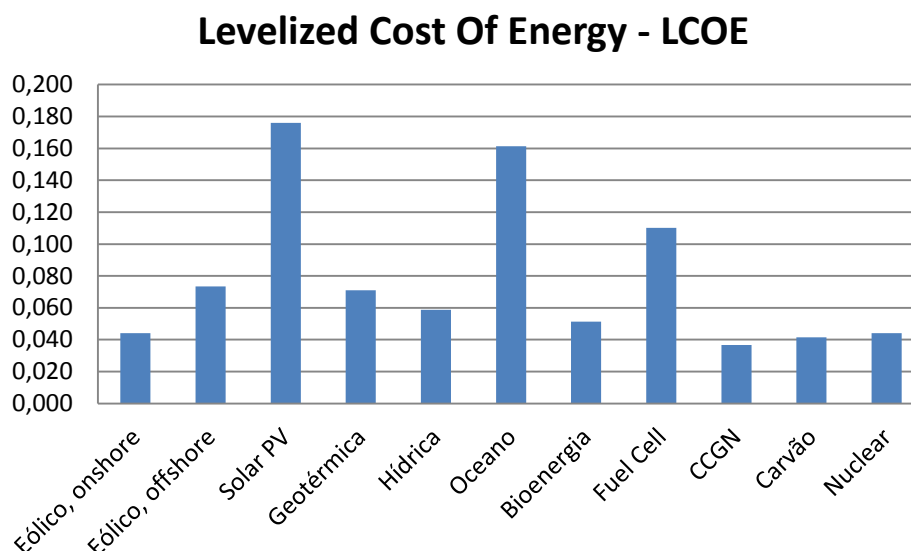


Gráfico 5 - Levelized cost of energy (LCOE), por fonte, em €/kWh (fonte: OpenEL Transparent Cost Database).

Face a esta dificuldade, a redução do consumo energético é uma solução óbvia, simples e atraente, já que permite minimizar problemas relacionados com o investimento nas fontes de energia, com o aumento da emissão dos gases de efeito de estufa e com a capacidade de abastecimento de energia. De modo a fomentar a redução do consumo energético, são criadas e aplicadas várias políticas e ferramentas de eficiência energética que permitem diminuir a dependência energética, enquanto o nível de vida se mantém cada vez mais exigente. Estas políticas de eficiência energética podem ter um alargado espectro de aplicação, que passa pelos vários setores de atividade comercial, pelo setor da indústria, pelos transportes e pelos edifícios.

No setor dos edifícios, é cada vez mais evidente a imperiosidade de implementação de medidas de eficiência energética ao nível estrutural e de equipamentos, com vista à racionalização de consumos, já que o aumento da qualidade e do conforto disponibilizados aos utilizadores dos edifícios do setor residencial, implicam normalmente a oneração do investimento e o consequente acréscimo de consumos energéticos.

Em Portugal, o consumo energético associado ao setor dos edifícios tem vindo a aumentar, representando, em 2008, cerca de 29% (fonte: DGEG) do consumo total de energia primária, assumindo os edifícios do parque residencial cerca de 17% (Fonte: DGEG). Com vista a regulamentar e harmonizar as questões relacionadas com o consumo energético neste setor, foi criado o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 118/2013, de 20 de Agosto. O RCCTE, publicado em 1993 e alterado em 2006, o qual visou regular e salvaguardar o estabelecimento das condições de conforto térmico nos edifícios sem necessidades excessivas de energia quer no Inverno quer no Verão. Após a recente publicação do Decreto-Lei nº 118/2013, de 20 de agosto, foram implementadas novas regras e o referido RCCTE passou a chamar-se Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH).

Partindo deste contexto, esta dissertação visa determinar o consumo energético de um parque residencial na estação de aquecimento e arrefecimento com uma simulação de Monte Carlo e o REH como algoritmo.

## 1.2 Objetivos e Estrutura

A presente dissertação tem como objetivo aplicar o método de Monte Carlo na determinação das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento dos edifícios do parque residencial com base na metodologia de cálculo prevista na nova regulamentação aprovada pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto. Para isso, é necessária uma revisão bibliográfica sobre os dados estatísticos relacionados com a caracterização do parque residencial e do clima que constituem o caso de estudo, ou seja, dados representativos do território português. Constitui também como objetivo a comparação dos resultados obtidos com os valores máximos admissíveis, que estão também presentes no REH.

Tendo em conta os objetivos estabelecidos, esta dissertação está estruturada em 7 capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma abordagem à evolução do panorama energético de Portugal, começando por descrever o panorama geral, por fonte, ao longo dos últimos, acabando por ser feita uma descrição do consumo no setor de edifícios. Assim, a descrição do consumo energético é feita seguindo uma abordagem de “afunilamento”.

No Capítulo 3 é realizada uma caracterização do clima e do parque residencial em Portugal.

No capítulo 4 é feita uma descrição da metodologia do cálculo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, presente no Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), bem como a metodologia para a determinação dos valores limites máximos das necessidades.

No capítulo 5 é feita uma descrição sobre o que consiste o método de Monte Carlo e de que maneira é aplicado na simulação em ambiente Matlab, a fim de determinar as necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento. Nesta abordagem à simulação de Monte Carlo são estabelecidos certos pressupostos e condições necessárias a serem aplicadas no código Matlab de modo a simplificá-lo e a torná-lo mais eficiente. Tendo em conta estes pressupostos, são estabelecidos os parâmetros a serem gerados aleatoriamente no âmbito de Monte Carlo.

No capítulo 6 são apresentadas as distribuições de frequência, sob a forma de histogramas, dos parâmetros gerados (*input*) e dos resultados obtidos (*output*).

No capítulo 7 é feita a discussão e análise dos resultados obtidos para que se possam retirar ilações e as respetivas conclusões que serão apresentadas no capítulo 8.

No capítulo 9 são apresentadas as referências bibliográficas, ou seja, a literatura de onde é retirada toda a informação teórica relevante à dissertação.

Nos anexos A, B e C constam todas as tabelas e gráficos com informação relevante às variáveis de entrada, cálculos de fatores do REH e resultados, respetivamente.



## 2. Evolução consumo energético do parque residencial em Portugal

Nos últimos anos, o consumo energético em Portugal tem evoluído de forma irregular, mas gradual, sendo que a nível de energia primária, os combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, têm sofrido um assinalável decréscimo (Gráfico 6). O gás natural, apesar de ser um recurso fóssil, tem vindo a ser usado cada vez mais por ser mais cómodo, ecológico e ter um preço mais competitivo, ao contrário do carvão e do petróleo. A par do gás natural, o uso das energias renováveis como fonte primária, tem também vindo a aumentar, principalmente para a produção de eletricidade e calor.

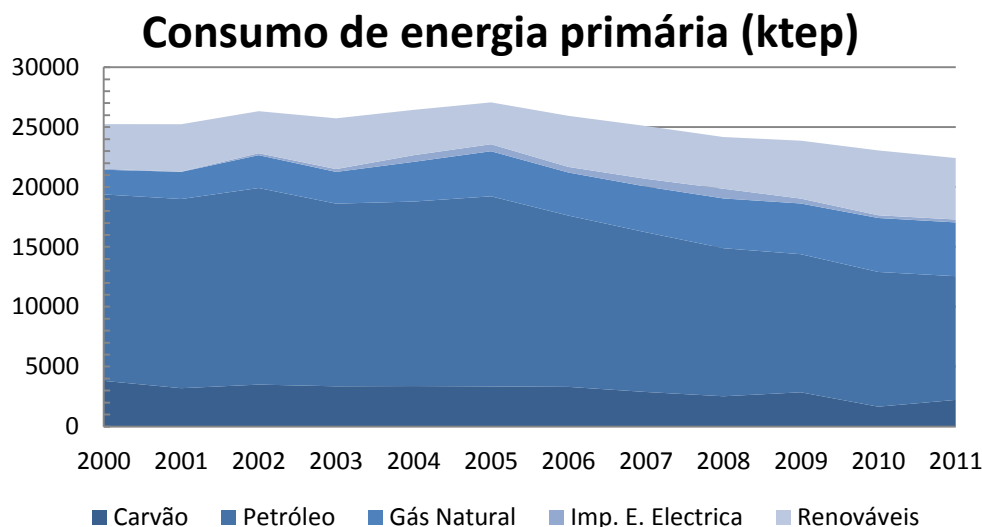


Gráfico 6 - Evolução do consumo de energia primária em Portugal, por fonte, em ktep, entre 2000 e 2011 (fonte: Desdobrável 2000-2011 - DGEG)

Em relação ao consumo final, podemos ver no Gráfico 7 que a fonte de energia final mais utilizada é o petróleo. Este domínio deve-se ao seu uso como combustível de eleição dos transportes, na forma de gasolina, gasóleo e GPL.

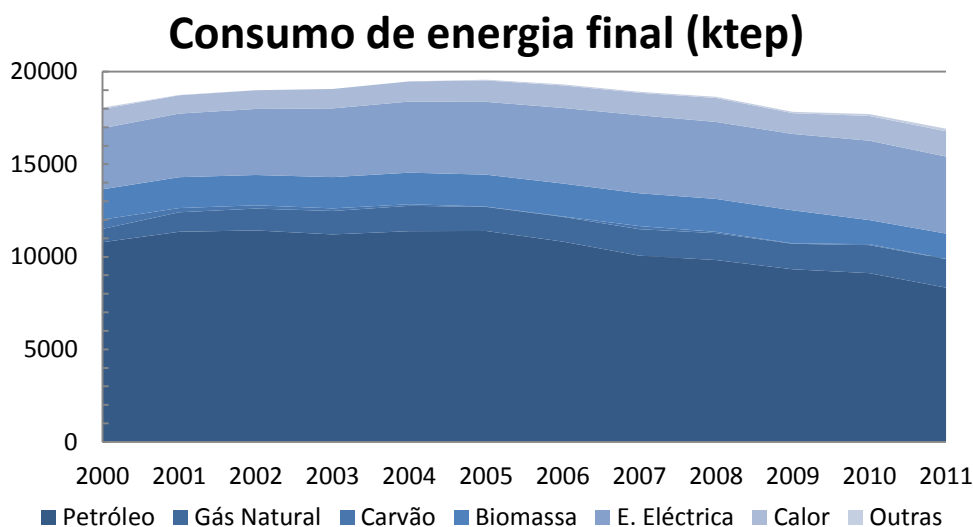


Gráfico 7 - Evolução do consumo de energia final por fonte, em ktep, desde 2000 até 2011 (fonte: Desdobrável 2000-2011 (DGEG)).

Comparando o Gráfico 8 e Gráfico 9, é de notar que, entre 2000 e 2011, o consumo de energia elétrica teve um aumento de 6,3 %, enquanto o uso de carvão passou a ser praticamente inexistente. Ao longo do período de estudo, o consumo total de energia final aumentou gradualmente até 2005, em que atingiu um valor à volta dos 19500 ktep. A partir de 2005, o consumo final tem vindo a diminuir, provavelmente devido à crescente implementação de medidas de eficiência energética, principalmente no setor dos transportes, já que o consumo de petróleo como energia final teve a descida mais acentuada.

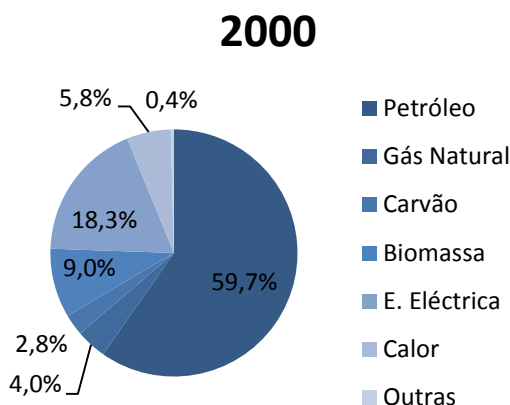


Gráfico 8 - Distribuição do consumo de energia final por fonte para 2000 (fonte: Desdobrável 2000-2011 (DGEG)).

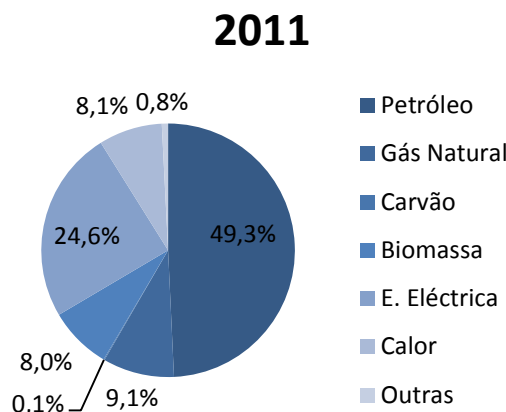


Gráfico 9 - Distribuição do consumo de energia final por fonte para 2011 (fonte: Desdobrável 2000-2011 (DGEG)).

Partindo do Gráfico 9, a distribuição do consumo de energia final por setor, do ano 2011 está ilustrada no Gráfico 10. Os focos de consumo são os setores de Transportes, Indústria, Doméstico e Serviços. No setor dos Transportes, a maior fonte de energia é o petróleo (99% do consumo total), sendo que é usado na sua maioria em transportes rodoviários. As indústrias transformadoras são os principais consumidores do setor industrial (97%) e as suas principais fontes de energia são a eletricidade (23%), calor (29%) e gás natural (29%). No setor doméstico, a eletricidade constitui cerca de 42% do consumo energético deste setor, ao passo que nos serviços constitui 74%.

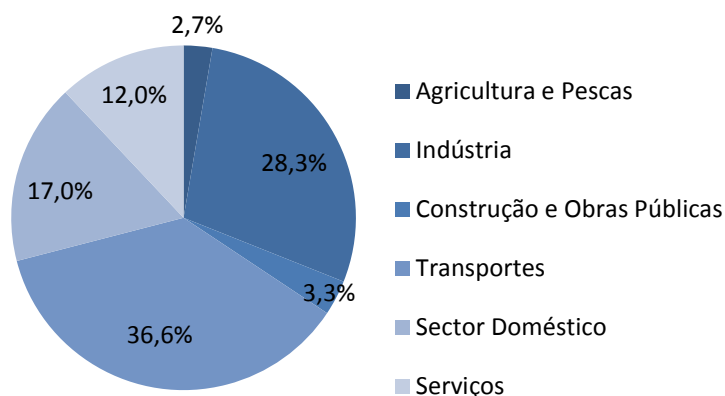


Gráfico 10 - Distribuição do consumo por setor de 2011 (fonte: Balanço Energético 2011 (DGEG)).

Ao analisar o Gráfico 11 é possível discriminar dois períodos na evolução do consumo energético no setor doméstico. Um período que durou até 2005, em que se registou um crescimento tendencial e sustentado do consumo energético até atingir os 3231 ktep. Esta tendência deve-se ao crescente número de habitações a serem construídas, aliado ao aumento do nível de qualidade de vida e das exigências de conforto térmico. Isto implica um aumento na instalação e aplicação de equipamentos, na sua maioria elétricos, de aquecimento e arrefecimento ambiente, de aquecimento de águas e outros eletrodomésticos. Muitas vezes estes são pouco eficientes e necessitam de um uso racional para não tornar o consumo de energético excessivo.

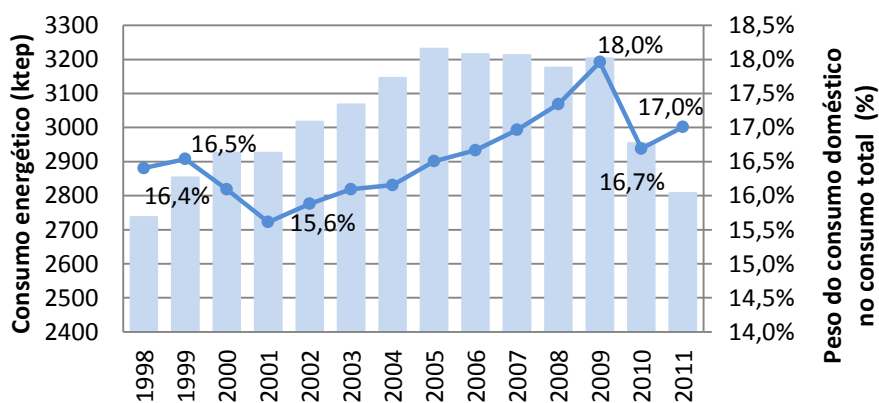


Gráfico 11 - Evolução do consumo no setor doméstico, em tep, e o seu peso no consumo final total, em %, entre 1998 e 2011 (fonte: Balanço Energético (DGEG)).

A partir de 2006, dá-se a inversão da tendência do consumo, ou seja, é o ano em que o consumo decresce em relação ao ano anterior. Esta descida no consumo, verificada a partir de 2006 até 2011, é marcada por dois períodos. Até 2009 o consumo decresceu ligeiramente, ano a ano, até que teve um aumento brusco e foi neste momento em que o peso do consumo doméstico atingiu um máximo de 18% em relação ao consumo total. Nos anos seguintes, o consumo teve uma descida brusca. De notar que apesar de 2010 para 2011 o consumo ter diminuído, o seu peso no consumo total aumentou de 16,7% para 17%.

Porém, apesar de o consumo em termos absolutos ter diminuído, o seu peso no consumo total continuou a aumentar até 2009, ao atingir uma proporção de 18,0% do consumo final total, diminuindo para 16,7% em 2010. Em 2011, apesar de o consumo ter diminuído significativamente para os 2807 ktep, o seu peso no total aumentou novamente, agora para os 17,0%. Neste caso, o consumo nos setores dos transportes e de indústria teve uma diminuição mais significativa que a do setor doméstico, daí o peso no consumo final total ter aumentado.

Segundo um Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico em 2010, feito pela INE e DGEG, em Portugal, existiam 3 932 010 alojamentos consumidores de energia, encontrando-se a distribuição do consumo de energia por tipo de utilização conforme especificado no Gráfico 12, em que os três principais consumidores de energia nos alojamentos são o aquecimento ambiente, o aquecimento de águas e a cozinha.

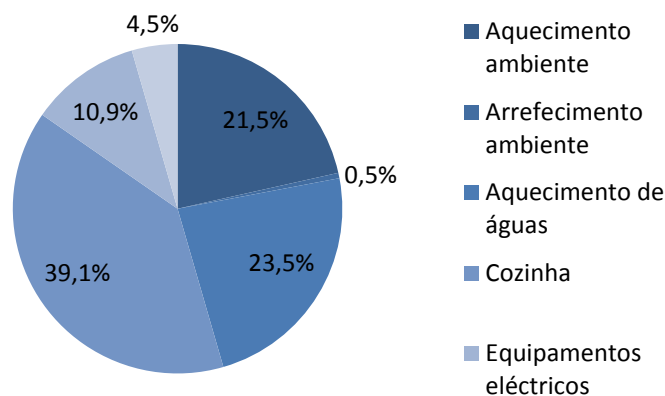


Gráfico 12 - Distribuição do consumo energético nos alojamentos por tipo de utilização [fonte: ICESD 2010 (INE e DGEG)].

### 3. Caracterização do clima e do parque residencial de Portugal

#### 3.1 Caracterização do clima português

Portugal é um país de clima temperado mediterrânico cujos verões são geralmente quentes e os invernos moderados. Sendo um dos países europeus mais amenos, a temperatura média anual varia entre aproximadamente os 8 °C (no norte) e os 17 °C (no sul). A variação de temperatura média anual em Portugal Continental está ilustrada na Figura 1. As diferenças de temperatura ao longo do território português podem ser explicadas por vários fatores como a latitude, a altitude, a proximidade do mar e o relevo.

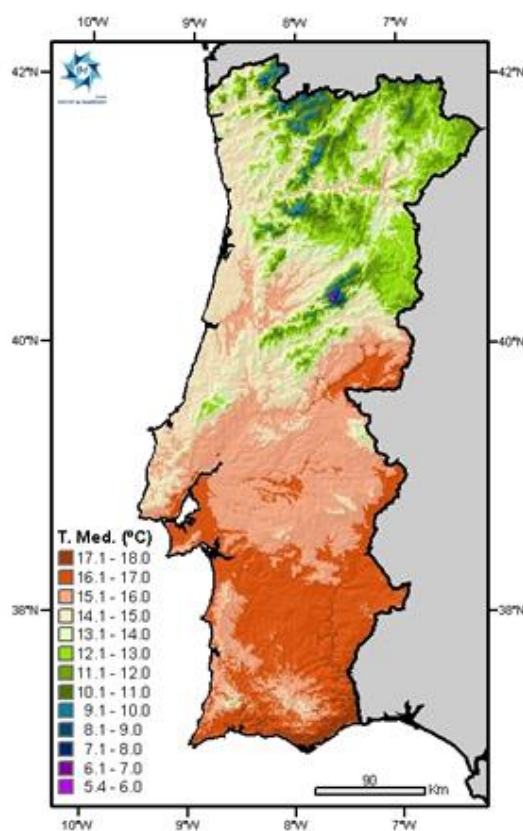


Figura 1 - Temperatura média anual (fonte: IPMA).

Tendo em conta os fatores mencionados e a análise da Figura 1, pode-se considerar que existem quatro conjuntos climáticos em Portugal Continental: Norte Litoral, Norte Interior, Sul e Regiões Montanhosas.

O Norte Litoral caracteriza-se por ser um clima mediterrânico com influências marítimas, ou seja, quer o verão quer o inverno são moderados, pelo que as amplitudes térmicas anuais são relativamente baixas. Tem tendências a humidade alta e precipitação elevada durante quase todo o ano. O Norte Interior (ou Continental) caracteriza-se por ter Verões quentes e secos enquanto os Invernos são rigorosos com ocorrência de precipitação, por vezes em forma de neve. Isto resulta nas maiores

amplitudes térmicas anuais do país. Em termos de precipitação, os valores são baixos, havendo mesmo meses de seca durante o Verão.

O clima do Sul caracteriza-se por ter um verão prolongado e quente, chegando a ter cinco meses secos e o inverno é ameno, com pouca precipitação. Neste clima, a precipitação é a menor do país, ao longo do ano. Desta maneira, considera-se que é um clima seco com muito pouca humidade.

O clima das Regiões Montanhosas é considerado como um clima de altitude, caracterizado por ter invernos rigorosos e verões frescos e húmidos. É um ambiente bastante húmido, ocorrendo precipitação elevada ao longo do ano, sendo que no inverno ocorre em forma de neve.

Em alternativa a esta caracterização, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger expressa na Figura 2, o clima de Portugal é um clima mediterrânico, *Csa* no sul e *Csb* no norte. Isto quer dizer que no sul o inverno é chuvoso e o verão quente e seco (*Csa*), no norte o inverno é chuvoso e o verão seco e pouco quente (*Csb*).

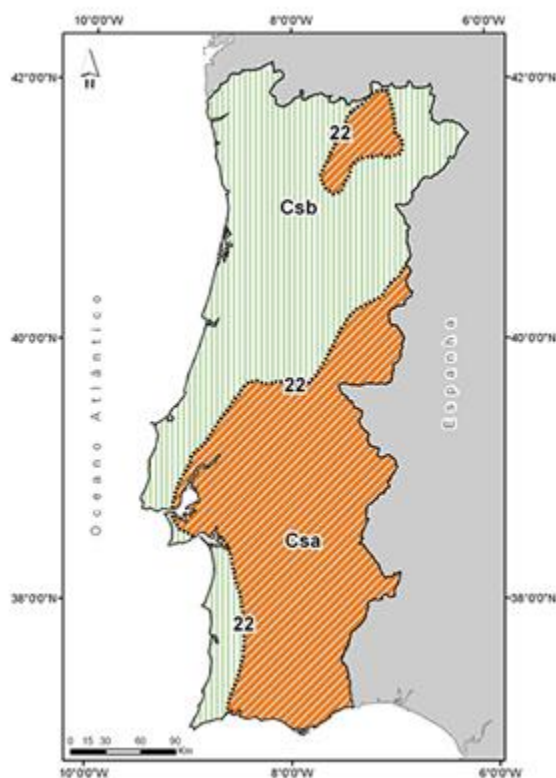


Figura 2 - Clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Köppen (fonte: IPMA).

Conforme anteriormente referido, as diferenças de climas ocorrem por causa de vários fatores como a latitude, altitude, proximidade do mar e o relevo. Em Portugal, o efeito destes fatores é bem evidente nos conjuntos climáticos anteriormente explicados. Assim, de modo a avaliar o efeito do clima no cálculo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, foram criados modelos de classificação do clima português de acordo com as diferentes regiões do país. De acordo com o Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), o país pode ser dividido em três zonas climáticas para o período de aquecimento e para o de arrefecimento.

As zonas climáticas de Inverno são definidas tendo em conta o critério do número de graus dias ( $GD$ ) (ver 5.5.1), tendo como base a temperatura de 18 °C, durante a estação de aquecimento. Dependendo do valor de  $GD$ , a região pode ser uma zona  $I_1$ ,  $I_2$  ou  $I_3$ . Na Tabela 1 estão os valores limite do critério e a zona climática correspondente.

Tabela 1 - Critérios para a determinação da zona climática de inverno (fonte: REH).

Zona	$I_1$	$I_2$	$I_3$
Critério	$GD \leq 1300$	$1300 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$

As zonas climáticas de verão são definidas tendo em conta o critério da temperatura média exterior ( $\theta_{ext}$ ) durante a estação convencional de arrefecimento (ver 5.5.1). Dependendo do valor de  $\theta_{ext}$ , a região pode ser uma zona  $V_1$ ,  $V_2$  ou  $V_3$ . Na Tabela 2 estão os valores limite do critério e a zona climática correspondente.

Tabela 2 - Critérios para a determinação da zona climática de verão (fonte: REH).

Zona	$V_1$	$V_2$	$V_3$
Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C} < \theta_{ext,v} \leq 22^\circ\text{C}$	$\theta_{ext,v} > 22^\circ\text{C}$

Juntamente com as características relativas ao parque edificado, as zonas climáticas e os respetivos valores de  $GD$  e  $\theta_{ext,v}$  são parâmetros essenciais na determinação das necessidades nominais de energia útil para o período de aquecimento e de arrefecimento.

### 3.2 Caracterização do parque residencial português

Em Portugal, o parque habitacional existente possui características que variam conforme a região onde se encontra e a data em que os edifícios foram construídos. Estas características podem estar relacionadas com a geometria da habitação, os materiais usados na construção, a orientação das fachadas e os elementos arquitetónicos constituintes da habitação. Ao longo do tempo, o plano de construção dos edifícios de habitação foi mudando, podendo ser influenciado pelo clima político, económico ou até mesmo pelo panorama energético e ambiental vivido no país.

Segundo o Censos 2011, promovido pelo INE, existem atualmente 3 544 389 edifícios de habitação em Portugal (ver Gráfico 13), sendo que Norte é a região onde se concentra a maior parte, com 34%. Na Região Autónoma da Madeira encontra-se a menor quantidade de edifícios de habitação com apenas 2%.

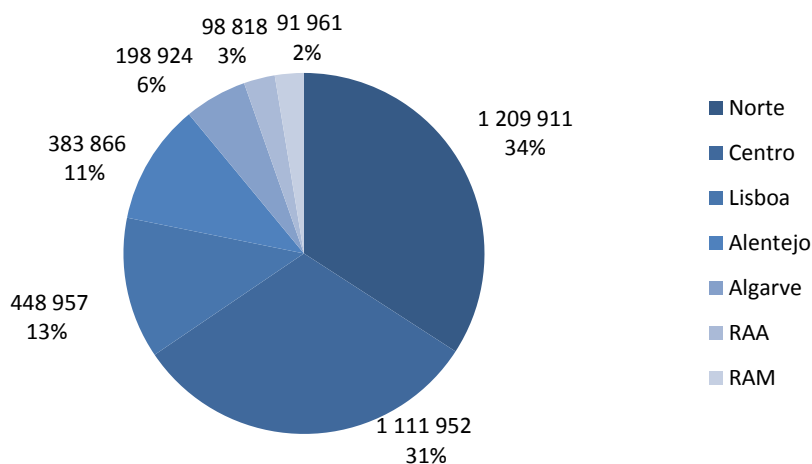


Gráfico 13 - Número de edifícios de habitação por região de Portugal (fonte:INE, Censos 2011).

A época de construção é uma variável a ter em conta, uma vez que é nos alojamentos mais antigos onde ocorrem as maiores perdas de energia. Desta maneira, a época de construção é uma variável bastante importante para a análise do consumo de energia no parque habitacional.

Tendo em conta o que foi anteriormente referido, no Gráfico 14 temos o número de edifícios de habitação por época de construção e podemos observar que o número de edifícios construídos aumentou constantemente até 1970, sendo que na década de 70 houve um aumento brusco no número de edifícios de habitação construídos. Verifica-se que é no período compreendido entre 1971 e 1980 que são construídos mais edifícios do que qualquer outro período, à volta de 589 mil edifícios foram construídos, ou seja, 17% do total. A partir de 1981, este número decresceu em cada década, apesar de este número ser ainda maior que nos anos anteriores a 1971. Verifica-se também que cerca de 63%, do total de 3 544 389 edifícios, foram construídos a partir de 1971, de modo que se pode afirmar que a maioria dos edifícios existentes são relativamente recentes.

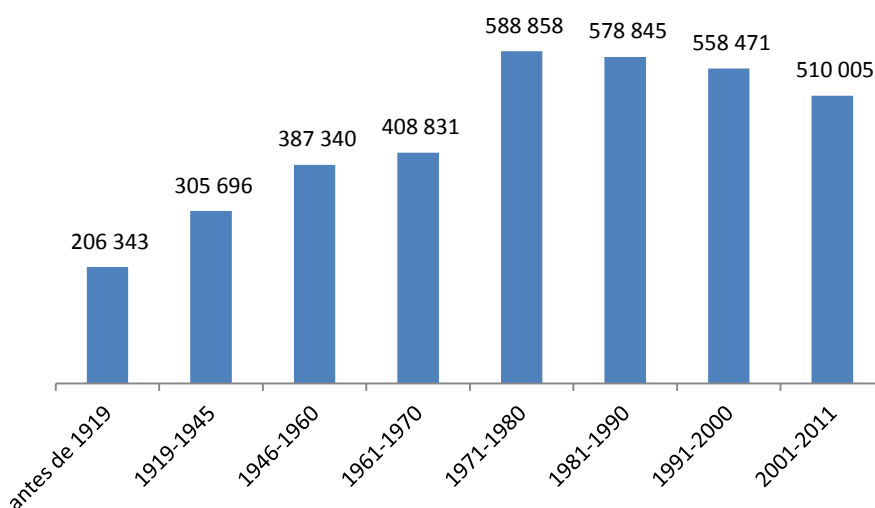


Gráfico 14 - Número de edifícios de habitação segundo a época de construção (fonte: INE, Censos 2011).

No Gráfico 15, estão distribuídos por região de país os edifícios enumerados no Gráfico 14, segundo a época da construção. Podemos observar que, com uma média de 34%, o Norte é a região onde se



concentra a maior parte dos edifícios construídos em quase todas as épocas, exceto entre 1919 e 1970. O Centro é a região com a segunda maior percentagem média de edifícios construídos (31%), sendo que foi onde se construiu mais entre 1919 e 1970. A Região Autónoma da Madeira é a região com a menor percentagem de edifícios construídos em todas as épocas, constituindo apenas, em média, 2,6%.

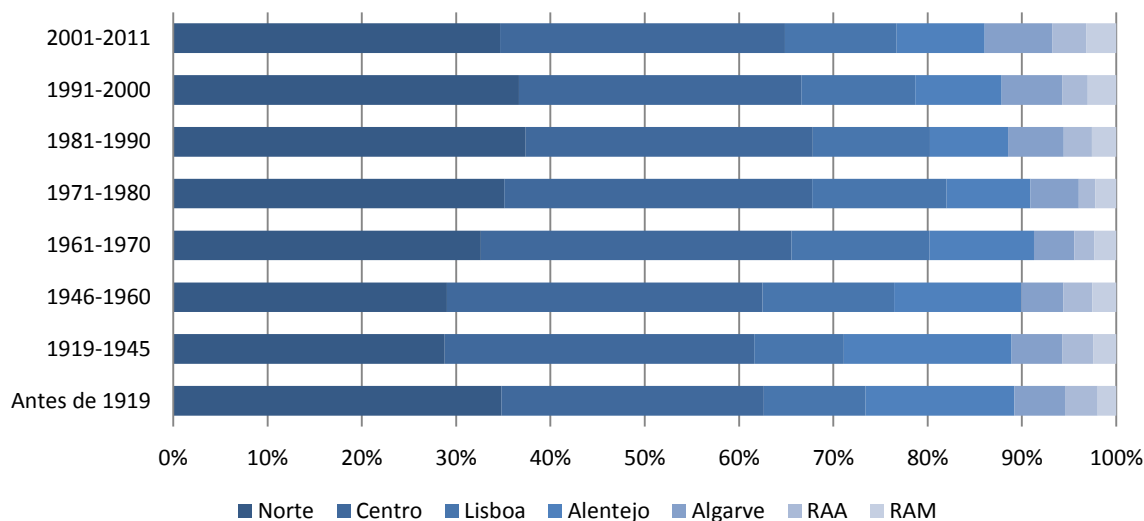


Gráfico 15 - Edifícios por região e por época de construção (fonte: INE, Censos 2011).

A maior parte dos 3 544 389 edifícios existentes são de baixa altura tal como ilustrado pelo Gráfico 16, que diz que 84% dos edifícios de habitação possuem apenas um ou dois pisos. A maior parte dos edifícios de 1, 2 e 3 pisos encontram-se na região do Norte e Centro (Gráfico 17) e os de 4 ou mais pisos encontram-se, na sua maior parte, na área de Lisboa, representando cerca de 43,5%.

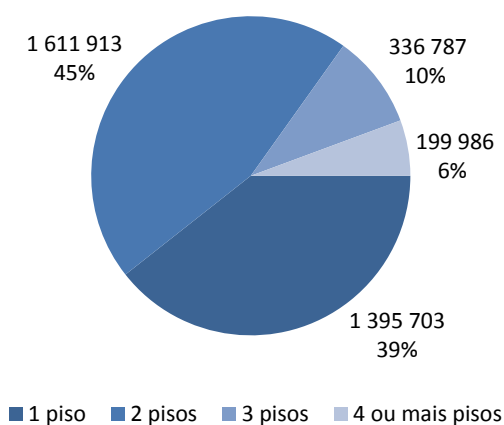


Gráfico 16 - Número de edifícios segundo o número de pisos do edifício (fonte: INE, Censos 2011).

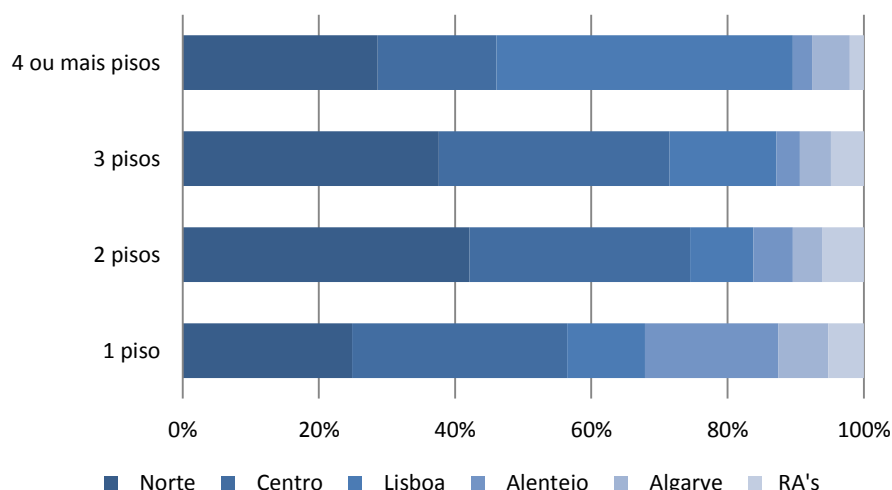


Gráfico 17 - Distribuição de edifícios segundo o número de pisos do edifício (fonte: INE, Censos 2011).

A grande maioria dos edifícios de habitação em Portugal possui apenas um alojamento constituindo cerca de 87% dos edifícios existentes. Sendo que os edifícios com 1 ou 2 pisos constituem 84% do parque habitacional, é plausível afirmar que a maioria dos alojamentos possui 1 ou 2 pisos.

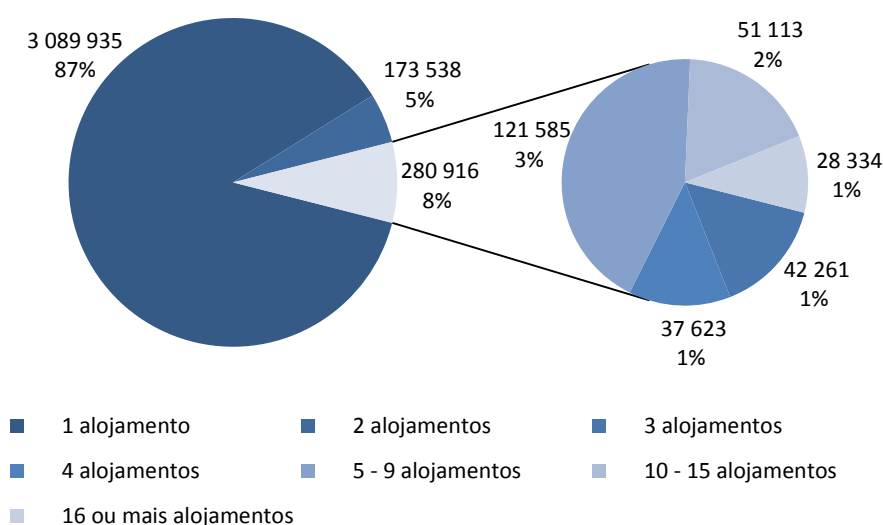


Gráfico 18 - Número de edifícios segundo o número de alojamentos (fonte: INE, Censos 2011).

Até agora, foi feita uma descrição cronológica do parque habitacional, da sua constituição e da localização em Portugal. Além dos parâmetros referidos, é importante também realizar uma caracterização a nível da construção do edifício, a qual pode ser feita sobre o tipo de estrutura, sobre o revestimento exterior das paredes e sobre a sua cobertura.

A nível de estrutura, segundo o Gráfico 19, a maior parte dos edifícios de habitação possuem uma estrutura de betão armado ou paredes de alvenaria com placa. De notar que ambos os tipos de estrutura apenas apareceram pela primeira vez durante período compreendido entre 1919 e 1945 (Gráfico 20).

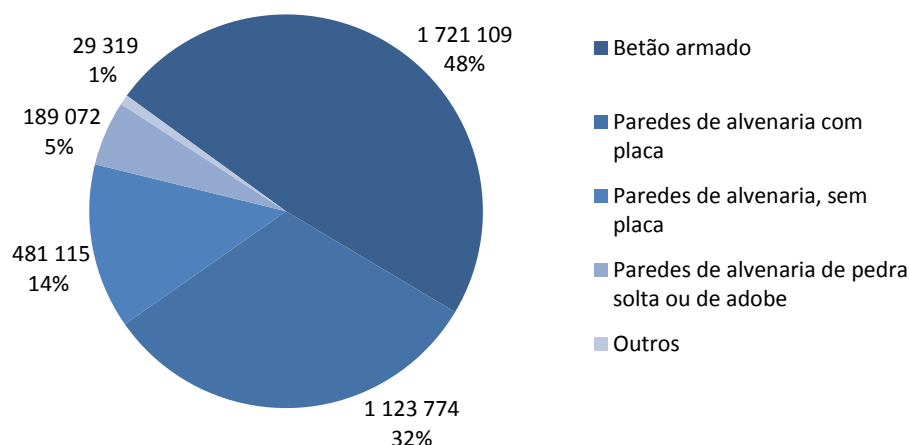


Gráfico 19 - Número de edifícios segundo a estrutura de construção (fonte: INE, Censos 2011).

O aparecimento do betão dá-se por volta de 1930 quando se começou a substituir os pavimentos de madeira nas cozinhas e casas de banho por lajes maciças até que veio substituir, por completo, o pavimento do piso. No caso de bairros sociais surgem os edifícios de baixa qualidade de alvenaria de tijolo com alguns elementos horizontais em betão armado. No final da década de 30 aparecem as estruturas integralmente em betão armado.

Na década do 50, o betão estabelece o seu papel preponderante na construção dos edifícios, ao apresentar pavimentos de laje maciça e uma estrutura porticada, ambos de betão armado. Quer as paredes interiores quer o preenchimento da periferia das estruturas por paredes duplas são de alvenaria de tijolo. Dito isto, verifica-se, através do Gráfico 20, que a aplicação de betão armado nas estruturas de construção dos edifícios teve um aumento progressivo desde o primeiro período em que foi aplicado até a atualidade.

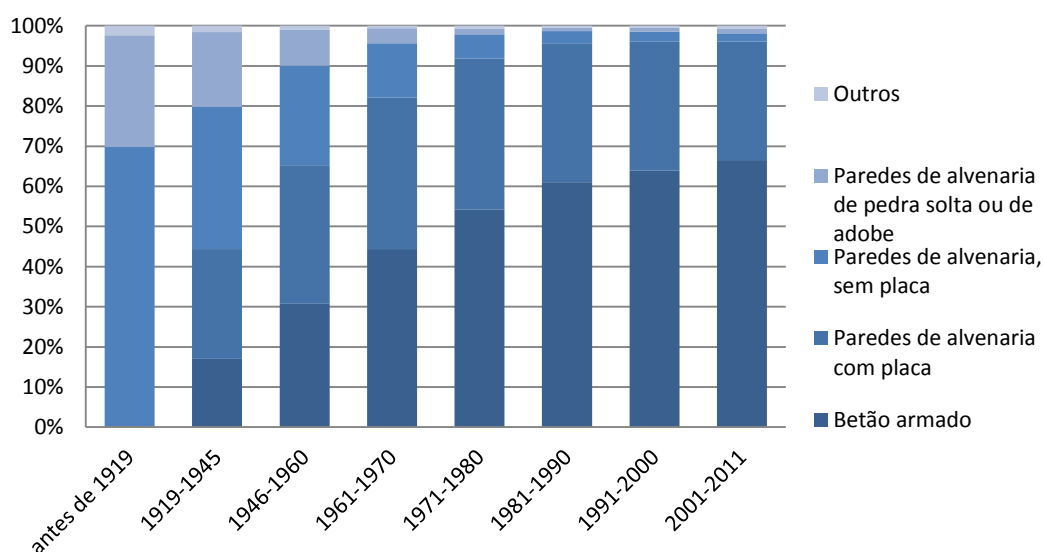


Gráfico 20 - Distribuição de edifícios segundo o tipo de estrutura construção, por época de construção do edifício (fonte: INE, Censos 2011).

Observando o Gráfico 21, é possível verificar que a maior parte dos edifícios de habitação possuem um revestimento exterior da parede em reboco tradicional ou marmorite, representando 84% dos edifícios construídos. A pedra é o segundo material mais usado com 11%.

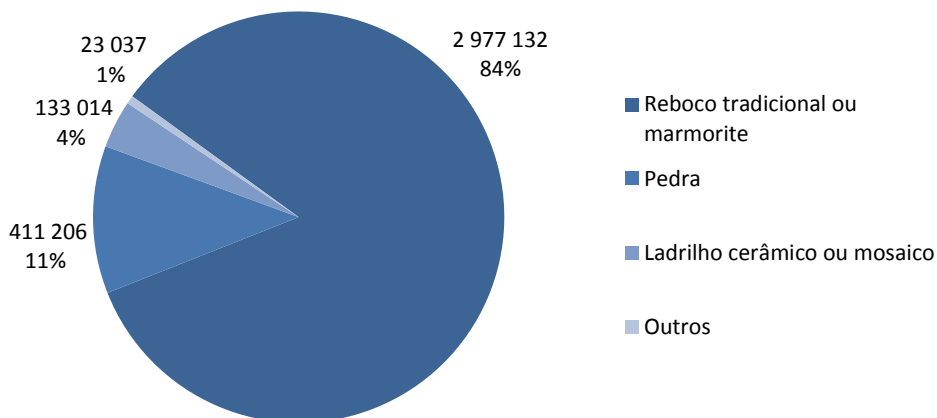


Gráfico 21 - Número de edifícios segundo o revestimento exterior das paredes (fonte: INE, Censos 2011).

Pela análise do Gráfico 22, é possível verificar que o reboco foi sempre o material mais usado para revestimento exterior das paredes, tendo um aumento progressivo face ao revestimento de pedra desde 1919 até 1990, ano em que a sua utilização começou a estabilizar.

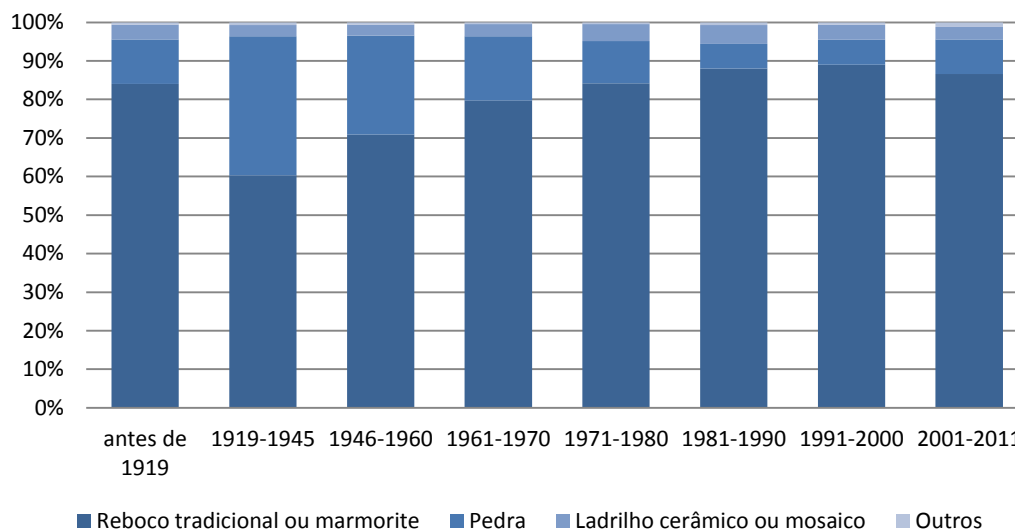


Gráfico 22 - Distribuição dos edifícios segundo o tipo de revestimento exterior das paredes, por época de construção do edifício (fonte: INE, Censos 2011).

Em relação ao tipo de cobertura, no Gráfico 23 é possível observar que mais de 90% dos edifícios possui uma cobertura inclinada revestida a telhas cerâmicas ou de betão. Este tipo de cobertura ao longo dos anos foi sempre o mais utilizado, no entanto, o seu peso diminui nos edifícios de construção mais moderna (Gráfico 24). Em contrapartida, o uso da cobertura do tipo terraço tem vindo a aumentar progressivamente, apesar de ainda não ser relevante no espectro total do tipo de coberturas.

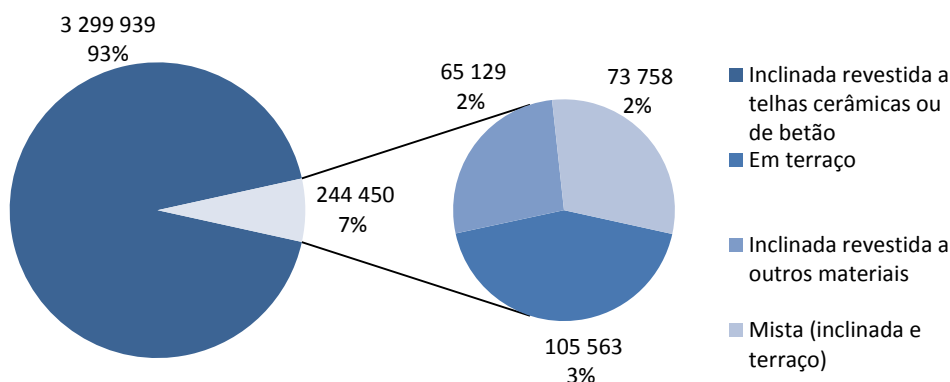


Gráfico 23 - Número de edifícios segundo o tipo de cobertura (fonte: INE, Censos 2011).

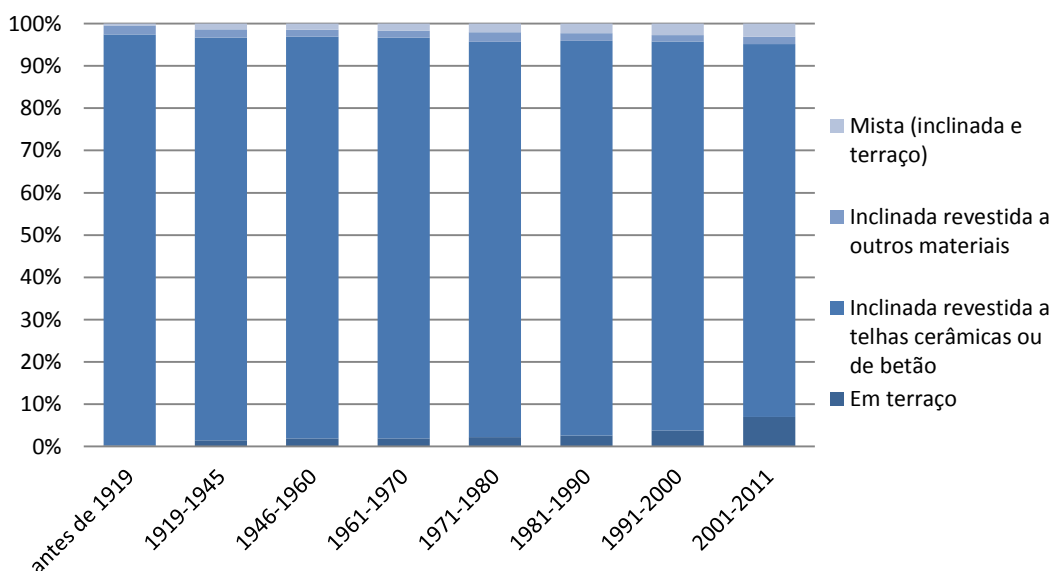


Gráfico 24 - Distribuição de edifícios segundo o tipo de cobertura, por época de construção do edifício (fonte: INE, Censos 2011).

A forma como os edifícios são construídos ou reconstruídos contribui para a utilização eficaz de energia solar passiva o que, por outras palavras, quer dizer que contribui para a eficiência energética dos edifícios. Assim, o tipo de construção e o revestimento dos edifícios são fatores fundamentais para a qualidade do seu e consequente eficiência energética, pelo que os materiais usados na estrutura de construção, no revestimento exterior das paredes e o tipo de cobertura, possuem especial importância neste tópico.

Se se tiver em conta o isolamento nas paredes exteriores e coberturas, verifica-se que a sua utilização ainda é reduzida contabilizando apenas 21,1% e 17% (ICESD 2010), respetivamente. O isolamento térmico aplicado nas janelas e a orientação das fachadas são também importantes para a eficiência energética nos edifícios. No entanto, segundo o ICESD 2010, verifica-se que em Portugal a sua

utilização ainda é reduzida dado que mais de 70% dos edifícios, nas suas fachadas, ainda usa *vidro simples*.

## 4. Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

O Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 118/2013, a 20 de agosto, visa estabelecer as regras em projetos de construção e manutenção de todos os edifícios de habitação e dos edifícios de serviços de modo a que sejam garantidas certas exigências de comportamento térmico. Tais exigências são fundamentalmente de **conforto térmico**, quer para o aquecimento quer para o arrefecimento, de **ventilação**, para que seja assegurada a qualidade de ar no interior dos edifícios, e de **água quente sanitária (AQS)**. O REH assegura, também, que estas exigências sejam satisfeitas sem uso excessivo de energia. De notar que o REH visa por outro lado minimizar a ocorrência de condensações superficiais ou internas que têm um impacto negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior.

As condições ambiente de conforto de referência são as condições de temperatura, humidade relativa, taxa de renovação de ar e consumo de AQS, consideradas como padrão ou referência no conforto térmico no interior de cada habitação. Segundo o REH, a temperatura do ar é de 18°C para o Inverno, ou estação de aquecimento, e de 25°C para o Verão, ou estação de arrefecimento. Em relação às AQS, o seu consumo de referência em edifícios de habitação é 40 litros de água quente a, no mínimo, 45°C por cada pessoa e por cada dia.

### 4.1 Cálculo dos índices de consumo energético presente no REH

A determinação do consumo energético para a totalidade do parque edificado é feita a partir do método de cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento do REH. Este método baseia-se nas disposições da norma europeia EN ISO 13790, sendo feitas as adaptações permitidas pela mesma para melhor se ajustar à realidade da construção e da prática de utilização dos edifícios em Portugal.

As necessidades energéticas dos períodos de aquecimento e de arrefecimento traduzem-se na energia necessária para manter o interior de um edifício ou fração autónoma nas condições de referência. Esta premissa implica que quantos maiores forem os valores dos índices de aquecimento e de arrefecimento, maior poderá ser a fatura energética para a climatização.

#### 4.1.1 Método de cálculo das necessidades de aquecimento

As necessidades nominais de aquecimento resultam da soma de três parcelas: a transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios ( $Q_{tr}$ ), a transferência de calor por ventilação ( $Q_{ve}$ ) e os ganhos de calor úteis resultantes dos ganhos solares pelo vão envidraçado, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes ( $Q_{gu}$ ). Estas três grandezas são quantificadas com unidades kWh.

O valor das necessidades ( $N_{ic}$ ) traduz-se, então, na seguinte equação:

$$N_{ic} = \frac{Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i}}{A_p} \quad (1)$$

em que  $A_p$  é a área útil de pavimento em  $m^2$ .

A transferência de calor por transmissão através da envolvente dos edifícios traduz-se em perdas de calor pelas paredes, pelos envidraçados, pela cobertura e pelo pavimento. Isto resulta da diferença de temperatura entre o exterior e o interior da fração em estudo e é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{tr} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{tr,i} \quad (2)$$

Em que  $GD$  corresponde ao número de graus-dias de aquecimento específico a região em estudo, representado em  $^{\circ}C \cdot dias$ . A parcela  $H_{tr,i}$  corresponde coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento, em  $W/^{\circ}C$ .

O coeficiente  $H_{tr,i}$  representa a transmissão de calor através dos elementos da envolvente, sendo estes paredes, envidraçado, coberturas, pavimentos e pontes térmicas planas. Para efeito de cálculo, resulta da soma de quatro parcelas:

$$H_{tr,i} = H_{ext} + H_{enu} + H_{adj} + H_{ecs} \quad (3)$$

Em que  $H_{ext}$  representa a transferência de calor através dos elementos da envolvente em contato com o exterior,  $H_{enu}$  com espaços não úteis,  $H_{adj}$  com edifícios adjacentes e  $H_{ecs}$  com elementos em contato com o solo. Tal como o coeficiente  $H_{tr,i}$ , são representados em  $W/^{\circ}C$ .

O coeficiente  $H_{ext}$  é determinado pela seguinte expressão:

$$H_{ext} = \sum_i [U_i \cdot A_i] + \sum_j [\psi_j \cdot B_j] \quad (4)$$

Em que  $U_i$  é o coeficiente de transmissão térmica do elemento  $i$  da envolvente [ $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ],  $A_i$  é a área do elemento  $i$  da envolvente, medida pelo interior do edifício, em  $m^2$ . O parâmetro  $\psi_j$  é o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear  $j$  [ $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ ] e  $B_j$  o respetivo desenvolvimento linear, medido pelo interior do edifício, em metros.

Os coeficientes  $H_{enu}$  e  $H_{adj}$  são determinados ambos com a seguintes expressão:

$$H_{enu} = H_{adj} = b_{tr} \left( \sum_i [U_i \cdot A_i] + \sum_j [\psi_j \cdot B_j] \right) \quad (5)$$

Em que  $b_{tr}$  é corresponde a um coeficiente de perdas de determinado espaço não útil ou de um edificio adjacente.



O cálculo do coeficiente de transmissão térmica através de elementos da envolvente em contato com o solo ( $H_{ecs}$ ) é feito através de seguinte expressão:

$$H_{ecs} = \sum_i [U_{bf_i} \cdot A_i] + \sum_j [z_j \cdot P_j \cdot U_{bw_j}] \quad (6)$$

Em que  $U_{bf_i}$  é o coeficiente de transmissão térmica do pavimento enterrado  $i$  [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ] e  $A_i$  é a área do respetivo elemento em contato com o solo, medido pelo interior do edifício em  $m^2$ . O parâmetro  $z_j$  é a profundidade media enterrada da parede em contato com o solo  $j$  (em metros),  $P_j$  é o desenvolvimento total da parede em contato com o solo  $j$ , medido pelo interior em metros, e  $U_{bw_j}$  o respetivo coeficiente de transmissão térmica [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ].

O  $Q_{ve,i}$  é determinado de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{ve,i} \quad (7)$$

onde

$$H_{ve,i} = 0,34 \cdot R_{ph,i} \cdot A_p \cdot P_d \quad (8)$$

em que  $H_{ve,i}$  representa o coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento ( $W/^\circ C$ ),  $R_{ph,i}$  é a taxa nominal de renovação de ar interior, na estação de aquecimento, em  $h^{-1}$ , e  $P_d$  é o pé direito médio da habitação, em metros.

No entanto, a expressão do cálculo das perdas de calor por ventilação pode ser diferente caso a esta seja assegurada por dispositivos que assegurem a recuperação de calor do ar extraído

$$Q_{ve,i} = 0,024 \cdot GD \cdot b_{ve,i} \cdot H_{ve,i} \quad (9)$$

onde

$$b_{ve,i} = 1 - \eta_{RC} \cdot \frac{\dot{V}_{ins}}{R_{ph,i} \cdot A_p \cdot P_d} \quad (10)$$

em que  $b_{ve,i}$  é o fator de correção da temperatura tendo em conta o sistema de recuperação de calor, com um rendimento  $\eta_{RC}$ , que insufla um caudal de ar médio  $\dot{V}_{ins}$  ( $m^3/h$ ).

Os ganhos de térmicos contabilizam os ganhos associados a fontes internas de calor e os ganhos associados ao aproveitamento da radiação solar. Os ganhos úteis ( $Q_{gu}$ ) são calculados a partir dos ganhos térmicos brutos ( $Q_{gi}$ ), usando um fator de utilização dos ganhos ( $\eta_i$ ).

$$Q_{gu,i} = \eta_i \cdot Q_{g,i} \quad (11)$$

Os ganhos térmicos brutos ( $Q_{g,i}$ ), em kWh, são determinados da seguinte maneira:

$$Q_{g,i} = Q_{int,i} + Q_{sol,i} \quad (12)$$

Os ganhos brutos resultantes de fontes internas ( $Q_{int,i}$ ) incluem qualquer fonte térmica situada no espaço a aquecer que resulta da dissipação de calor dos dispositivos não destinados ao aquecimento.

$$Q_{int,i} = q_{int} \cdot M \cdot A_p \cdot 0,72 \quad (13)$$

Em que  $q_{int}$  consiste nos ganhos internos médios, numa base de vinte e quatro horas por dia, todos os dias do ano, por unidade de superfície. Este parâmetro tem o valor constante de  $4 \text{ W/m}^2$ . O parâmetro  $M$  é a duração da estação de aquecimento, em meses.

Os ganhos solares ( $Q_{sol,i}$ ) resultam do aproveitamento da radiação solar através dos vãos envidraçados e determinam-se com a seguinte equação:

$$Q_{sol,i} = G_{sul} \sum_j \left[ X_j \sum_n F_{s,i_{nj}} \cdot A_{s,i_{nj}} \right] \cdot M \quad (14)$$

Em que  $G_{sul}$  é o valor médio mensal da energia solar média incidente numa superfície orientada a sul durante a estação de aquecimento ( $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{mês}$ ),  $X_j$  é o fator de orientação para as diferentes exposições (Tabela 22, ANEXO A),  $F_{s,i_{nj}}$  é o fator de obstrução do vão envidraçado  $n$  com a orientação  $j$  para o período de aquecimento (cálculo especificado no ANEXO B),  $A_{s,i_{nj}}$  é a área efetiva coletora da radiação solar da superfície  $n$  que tem a orientação  $j$ , em  $\text{m}^2$ , e  $M$  é a duração média, em meses, da estação de aquecimento. Os índices  $n$  e  $j$  correspondem, respetivamente, a cada superfície e a cada orientação.

No cálculo das áreas efetivas coletoras de radiação solar para cada orientação efetua-se o somatório das áreas coletoras situadas nesse octante. Sendo assim, o valor de  $A_{s,i_{nj}}$  deve ser calculado vão a vão, ou em conjuntos de vãos com características semelhantes de proteção solar e de incidência da radiação solar. Este valor determina-se com a seguinte equação:

$$A_{s,i_{nj}} = A_w \cdot F_g \cdot g_i \quad (15)$$

Onde  $A_w$  é a área total do vão envidraçado (vidro + caixilho);  $F_g$  é a fração envidraçada do vão envidraçado e  $g_i$  é o fator solar para radiação incidente no inverno (quer o cálculo de  $F_g$  quer o cálculo do  $g_i$  estão especificados no ANEXO B).

O elemento  $\eta_i$  da equação 10 é fator de utilização dos ganhos térmicos e é calculado em função da inércia térmica do edifício e da relação entre os ganhos brutos e as perdas térmicas ( $\gamma$ ).

$$\gamma = \frac{\text{Ganhos brutos}}{\text{Perdas}} = \frac{Q_g}{Q_t + Q_{ve}} \quad (16)$$

Por sua vez:

$$\begin{cases} \eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} & \text{se } \gamma \neq 1 \text{ e } \gamma > 0 \\ \eta = \frac{a}{a+1} & \text{se } \gamma = 1 \\ \eta = \frac{1}{\gamma} & \text{se } \gamma < 0 \end{cases} \quad (17)$$

Em que  $a$  é a inércia térmica do edifício. Esta pode tomar o valor 1.8, 2.6 ou 4.2 caso o edifício possua uma inércia fraca, média ou forte, respetivamente.

#### 4.1.2 Método de cálculo das necessidades de arrefecimento

A metodologia do cálculo das necessidades de arrefecimento é complementar à usada nos ganhos úteis durante o período de aquecimento. Os ganhos não úteis são aqueles que provocam as necessidades de arrefecimento no Verão. Desta maneira, pode-se aplicar o mesmo cálculo dos ganhos internos e solares úteis, no entanto, necessita de estar adaptado para as condições interiores e exteriores de Verão que afetam os ganhos úteis. Estes são os ganhos internos, solares e os ganhos através da envolvente opaca e transparente. Assim, as necessidades de arrefecimento são determinadas pela seguinte expressão:

$$N_{vc} = (1 - \eta_v) \cdot \frac{Q_{g,v}}{A_p} \quad (18)$$

Onde  $Q_{g,v}$  corresponde aos ganhos totais brutos, em kWh,  $\eta_v$  é o fator de utilização dos ganhos, anteriormente caracterizado nas equações 16 e 17, e  $A_p$  representa a área útil de pavimento, em m<sup>2</sup>.

Os ganhos térmicos brutos dependem da soma de duas parcelas de ganhos: ganhos térmicos associados a fontes internas de calor ( $Q_{int,v}$ ) ganhos pela envolvente exterior opaca e envidraçada ( $Q_{sol,v}$ ), todos em kWh.

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \quad (19)$$

Os ganhos internos térmicos resultam da libertação de calor pelos ocupantes, equipamentos e dispositivos de iluminação durante a estação de arrefecimento. São determinados com a seguinte expressão:

$$Q_{int,v} = q_{int} \cdot A_p \cdot \frac{L_v}{1000} \quad (20)$$

Em que  $L_v$  é a duração da estação de arrefecimento, igual a 2928 horas.

Os ganhos solares ( $Q_{sol,v}$ ) são determinados pela seguinte equação:

$$Q_{sol,v} = \sum_j \left[ I_{solj} \sum_n F_{s,vnj} \cdot A_{s,vnj} \right] \quad (21)$$

Em que  $I_{solj}$  é a energia solar incidente nos envidraçados (em kWh/m<sup>2</sup>) por cada orientação  $j$ ,  $F_{s,vnj}$  é o fator de obstrução da superfície do elemento  $n$ , com orientação  $j$  (cálculo especificado no ANEXO B), e  $A_{s,vnj}$  é a área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento  $n$  com a orientação  $j$ .

A área efetiva coletora de radiação solar de cada vão envidraçado  $n$  com a orientação  $j$ , é calculada com a expressão seguinte:

$$A_{s,vnj} = A_w \cdot F_g \cdot g_v \quad (22)$$

Em que à semelhança da equação (14),  $A_w$  é a área total do vão envidraçado (em m<sup>2</sup>), incluindo o vidro e o caixilho,  $F_g$  é a fração envidraçada do vão envidraçado e  $g_v$  é o fator solar do envidraçado, mas na estação de arrefecimento (quer o cálculo de  $F_g$  quer o cálculo do  $g_i$  estão especificados no ANEXO B).

A área efetiva coletora de radiação solar de elemento  $n$  na envolvente opaca exterior, com orientação  $j$ , é determinada através da seguinte expressão:

$$A_{s,vnj} = \alpha \cdot U \cdot A_{op} \cdot R_{se} \quad (23)$$

Em que  $\alpha$  é o coeficiente de absorção da radiação solar pela superfície do elemento da envolvente opaca,  $U$  é o coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente opaca [W/(m<sup>2</sup>.°C)],  $A_{op}$  é a área do elemento da envolvente opaca e o  $R_{se}$  é a resistência térmica superficial exterior que é igual a 0,04 W/(m<sup>2</sup>.°C).

A determinação do fator de obstrução de superfícies opacas é opcional, no entanto, quando considerada, deve-se seguir a mesma abordagem dos vãos envidraçados.

O cálculo de  $\eta_v$  usa a mesma expressão que a (16). No entanto, as perdas na estação de arrefecimento ( $Q_{p,v}$ ) dependem da diferença de temperatura entre o exterior e o interior. Neste caso, englobam as perdas térmicas através da envolvente por transmissão ( $Q_{tr,v}$ ) e as perdas devidas à renovação do ar ( $Q_{ve,v}$ ), todas em kWh.

$$Q_{p,v} = Q_{tr,v} + Q_{ve,v} \quad (24)$$

em que:

$$Q_{tr,v} = H_{tr,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot \frac{L_v}{1000} \quad (25)$$

onde

$$H_{tr,v} = H_{ext} + H_{enu} + H_{ecs} \quad (26)$$

O parâmetro  $H_{tr,v}$  é o coeficiente de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ],  $\theta_{v,ref}$  é a temperatura de referência na estação de arrefecimento, que é igual a  $25^\circ C$  e  $\theta_{v,ext}$  é a temperatura média exterior no período de arrefecimento (Tabela 17).

A determinação das parcelas de  $H_{ext}$ ,  $H_{enu}$  e  $H_{ecs}$  para a estação de arrefecimento segue uma abordagem comum ao período de aquecimento das mesmas.

A transferência de calor por renovação de ar no período de arrefecimento é calculada pela seguinte equação:

$$Q_{ve,v} = H_{ve,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot \frac{L_v}{1000} \quad (27)$$

Onde o coeficiente de transferência de calor por ventilação é determinado da seguinte maneira:

$$H_{ve,v} = 0,34 \cdot R_{ph,v} \cdot A_p \cdot P_d \quad (28)$$

Os parâmetros  $R_{ph,v}$ ,  $A_p$  e  $P_d$  são a taxa nominal de renovação de ar ( $h^{-1}$ ) na estação de arrefecimento, a área útil de pavimento ( $m^2$ ) e o pé direito médio, em metros, respetivamente.

No caso de a ventilação ser assegurada por meios providos de dispositivos de recuperação de calor, sem by-pass, o  $Q_{ve,v}$  é determinado da seguinte maneira:

$$Q_{ve,v} = b_{ve,v} \cdot H_{ve,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot \frac{L_v}{1000} \quad (29)$$

Onde

$$b_{ve,v} = 1 - \eta_{RC} \cdot \frac{\dot{V}_{ins}}{R_{ph,v} \cdot A_p \cdot P_d} \quad (30)$$

Em que  $b_{ve,v}$  é o coeficiente de correção de temperatura tendo em conta o sistema de recuperação de calor, com um rendimento  $\eta_{RC}$ , que insufla um caudal de ar médio  $\dot{V}_{ins}$  ( $m^3/h$ ).

## 4.2 Valor limite das necessidades nominais

De modo a limitar o consumo energético dos edifícios de habitação, no REH são estabelecidos cálculos para determinar os valores máximo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento.

### 4.2.1 Valor limite das necessidades de aquecimento

O valor limite máximo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento ( $N_i$ ) de uma habitação, em kWh/m<sup>2</sup>.ano, é determinado através de expressão análoga à das necessidades nominais:

$$N_i = \frac{Q_{tr,i_{ref}} + Q_{ve,i_{ref}} - Q_{gu,i_{ref}}}{A_p} \quad (31)$$

Em que  $Q_{tr,i_{ref}}$  é transferência de calor por transmissão através da envolvente de referência, na estação de aquecimento,  $Q_{ve,i_{ref}}$  é transferência de calor por ventilação de referência na estação de aquecimento e  $Q_{gu,i_{ref}}$  corresponde aos ganhos de calor úteis. Estas três são da estação de aquecimento e estão em kWh.

Estes parâmetros de referência devem ser determinados tendo em conta certas considerações:

- Para determinar  $Q_{tr,i_{ref}}$  considera-se que:
  - I. Os coeficientes de transmissão térmica superficial de referência ( $U_{ref}$ ) para elementos opacos e envidraçados são os indicados na Tabela 23 (ANEXO A), em função do tipo de elemento da envolvente e a zona climática.
  - II. Os coeficientes de transmissão térmica linear de referência ( $\psi_{ref}$ ) são os indicados na Tabela 24 no Anexo A, em função do tipo de ligação entre os elementos da envolvente do edifício.
  - III. A área de vão envidraçados apenas é considerada até 20% da área interior útil de pavimento do edifício, sendo que a área excedente deve ser somada à área da envolvente opaca exterior. Para ambos os tipos de elementos devem ser usados os respetivos coeficientes referidos na alínea I.
- Para determinar  $Q_{ve,i_{ref}}$  considera-se que:
  - I. A taxa de renovação de ar de referência ( $R_{ph_{ref}}$ ) é igual à taxa de renovação para o edifício em estudo, até um máximo de 0,6 h<sup>-1</sup>.
- Para determinar  $Q_{gu,i_{ref}}$  considera-se que :
  - I. Os ganhos térmicos associados aos aproveitamento da radiação solar são determinados da seguinte forma:

$$Q_{sol,i} = G_{sul} \cdot 0,182 \cdot 0,20 A_p \quad (32)$$

Os ganhos internos são determinados com uma abordagem em comum à expressão (13).

- II. O fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento de referência ( $\eta_{i_{ref}}$ ) é igual a 0,60.

#### 4.2.2 Valor limite das necessidades de arrefecimento

O valor máximo das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento ( $N_v$ ) de uma habitação ou fração autónoma, em kWh/(m<sup>2</sup>.ano) é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$N_v = (1 - \eta_{v_{ref}}) \cdot \frac{Q_{g,v_{ref}}}{A_p} \quad (33)$$

Em que  $\eta_{v_{ref}}$  é fator de utilização de ganhos de referência,  $Q_{g,v_{ref}}$  ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento, em kWh.

O fator de ganhos de referência na estação de arrefecimento é dado pela seguinte equação:

$$\eta_{v_{ref}} = \begin{cases} 0,52 + 0,22 \ln \Delta\theta & | \quad \theta > 1 \\ 0,45 & | \quad 0 < \Delta\theta \leq 1 \\ 0,30 & | \quad \Delta\theta \leq 0 \end{cases} \quad \text{e} \quad \Delta\theta = \theta_{ref,v} - \theta_{ext,v} \quad (34)$$

Em que  $\theta_{ref,v}$  é a temperatura interior de referencia na estação de arrefecimento, sendo esta igual a 25°C, e  $\theta_{ext,v}$  temperatura exterior media do local, na estação de arrefecimento.

Os ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento são determinados pela seguinte expressão:

$$Q_{g,v_{ref}}/A_p = \left[ q_{int} \cdot \frac{L_v}{1000} + g_{v_{ref}} \left( \frac{A_w}{A_p} \right)_{ref} I_{sol_{ref}} \right] \quad (35)$$

Em que  $q_{int}$  corresponde aos ganhos internos médios, contabilizados em 4 W/m<sup>2</sup>,  $L_v$  é a duração da estação de arrefecimento, igual de 2928 horas,  $g_{v_{ref}}$  é o fator solar de referência para a estação de arrefecimento, contabilizado em 0,43,  $\left( \frac{A_w}{A_p} \right)_{ref}$  é razão entre a área de vãos e a área interior útil de pavimento, que se assume igual a 20%, e  $I_{sol_{ref}}$  é a radiação solar média de referência, correspondente à radiação incidente numa superfície orientada a oeste [kWh/(m<sup>2</sup>.ano)].

## 5. Simulação de Monte Carlo

### 5.1 Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é usado para determinar heurísticamente soluções numéricas (*output*) através de parâmetros (*input*) gerados aleatoriamente (Figura 3). Geralmente, estas soluções consistem em distribuições de valores já que o *input* consiste num conjunto de parâmetros pseudo-aleatórios.

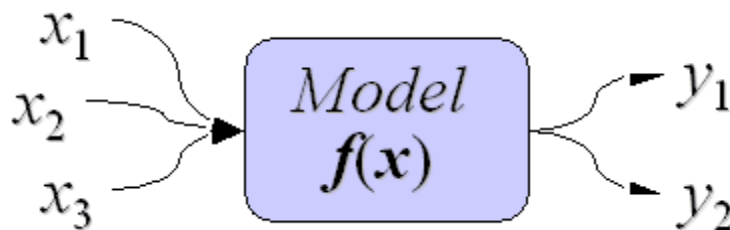


Figura 3 - Um modelo determinístico que usa variáveis de *input* para gerar variáveis de *output*.

Na Física e na Matemática, porém, as simulações de Monte Carlo são apropriadas quando é impossível obter expressões que possam ser definidas analiticamente através de um número finito de funções conhecidas, ou quando é inviável aplicar um algoritmo ou função determinística. Desta maneira, um sistema no qual se aplica o método de Monte Carlo é considerado um sistema estocástico. Ora, um processo estocástico caracteriza-se por usar probabilidades ou aleatoriedade nas suas variáveis de *input*, ou seja, as variáveis são aleatoriamente geradas a partir de uma distribuição de probabilidades para simular o processo de recolha de dados de uma *população* ou amostra real (Figura 4).

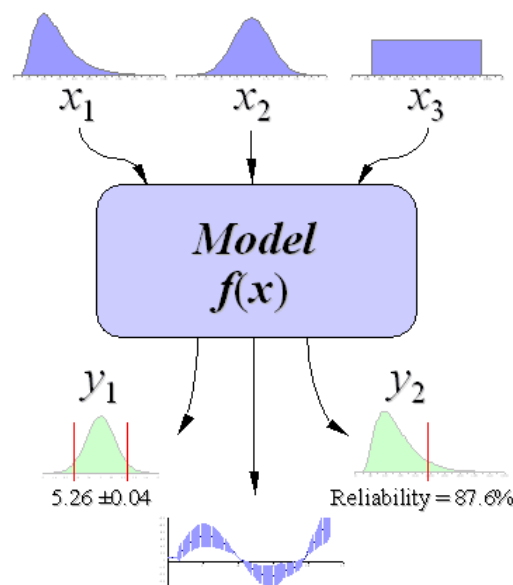


Figura 4 - Esquema representativo de um sistema estocástico.

Os parâmetros de *input*, que possuem uma distribuição aleatória, são usados de forma a obter um conjunto de parâmetros (*output*) a partir de um algoritmo ou sistema. Ao correr uma simulação de



Monte Carlo, o sistema é simulado um grande número de vezes, sendo que cada simulação pode ser considerada como um ciclo. Em cada ciclo, o *input*, que consiste num valor de cada parâmetro, pertencente a uma distribuição aleatória especificada, é usado para obter um resultado. O *output* final consiste, assim, num conjunto elevado de resultados que representam respostas separadas e independentes. O conjunto destes resultados, ou o *output*, consiste numa distribuição de probabilidades de possíveis cenários o que, na realidade, quer dizer que o *output* é uma distribuição probabilística. Quanto maior for o número de ciclos, mais precisa é a série de probabilidades gerada pela simulação.

Com a sua descrição, torna-se claro que o método de Monte Carlo tem como vantagem a capacidade de permitir variações em simultâneo das variáveis de entrada, possibilitando a correlação entre as variáveis. Sendo que usa distribuições probabilísticas do *input*, tem a faculdade de fornecer probabilidades de ocorrência dos resultados, bem como os seus intervalos de confiança e desvios padrões. Acresce o facto de não ser necessário uma certeza rigorosa nas distribuições de probabilidade já que o método de Monte Carlo permite modelar o caso de estudo e as incógnitas mediante as distribuições de probabilidade. Assim, não existe um limite quer na quantidade de dados que descrevem as variáveis de entrada quer o número de iterações de uma simulação.

No entanto, como em qualquer método, existem desvantagens que limitam e condicionam a sua aplicação. Na maioria das suas aplicações, é difícil definir quais as distribuições de probabilidade das variáveis mais apropriadas, bem como as correlações entre elas. Esta dificuldade, aliada ao facto de apenas serem fornecidas estimativas, leva a que a seja obtido um intervalo de resultados tão grande que distorça a realidade. Outro fator contra este método, é o facto de necessitar *softwares* caros para correr uma simulação e de um grande poder de processamento informático, já que resultados precisos exigem um grande número de iterações, o que por sua vez, exige um nível alto de processamento informático.

Neste tipo de simulações, as variáveis podem ter diferentes distribuições de probabilidade. Dependendo do tipo de distribuição de probabilidade do *input*, diferentes resultados podem ocorrer. Desta maneira, a simulação é mais precisa porque, neste caso, as distribuições probabilísticas representam uma incerteza nas variáveis mais realista. Tais distribuições são tipificadas da seguinte forma:

- **Distribuição normal**, ou de Gauss, que consiste numa curva de probabilidades simétrica onde os valores cuja probabilidade é maior encontram-se no meio. O centro acaba por ser o valor médio. Juntamente com a média, o desvio padrão é outro parâmetro que descreve a distribuição normal.
- **Distribuição log-normal**, que consiste na distribuição de uma certa variável quando o seu logaritmo tem uma distribuição normal. Representa apenas valores positivos e não tem limite

superior dos seus valores. Variáveis descritas por distribuições log-normais são o preço das ações e das reservas de petróleo.

- **Distribuição uniforme**, em que todos os valores têm igual probabilidade de ocorrência, sendo que os seus limites podem ou não ser definidos. Um exemplo deste tipo de distribuição é o resultado de um certo número de lançamentos de dados.
- **Distribuição discreta**, que consiste numa distribuição cujas variáveis apenas podem tomar valores discretos, num certo espaço amostral. A mais comum é a distribuição de Bernoulli que tem como resultado o valor 1 quando atinge sucesso ou 0 quando atinge fracasso.
- **Distribuição de Poisson**, que expressa a probabilidade de um certo número de eventos ocorrer num intervalo de tempo ou espaço definido. Estes eventos ocorrem independentemente do último evento ocorrido.

## 5.2 Etapas da simulação

Tendo em conta as características do modelo anteriormente explicadas e os requisitos necessários para o satisfazer, é necessário estabelecer as etapas a percorrer numa simulação, conforme a seguir indicado.

- A. Desenvolver o modelo conceptual do sistema, baseando-se na criação de um modelo que identifica as relações matemáticas entre as variáveis de entrada, ou *input*. Normalmente, este modelo ou conjunto de relações matemáticas chama-se um algoritmo. No problema em estudo, o algoritmo baseia-se no cálculo definido em 4.1. Nesta etapa, é importante definir as variáveis de entrada, ou *input*, que tenham uma influência significativa no modelo, juntamente com as suas distribuições de probabilidade
- B. Construir o algoritmo em ambiente computacional que no presente âmbito é em ambiente Matlab, desenvolvendo as equações e as adaptações adequadas.
- C. Verificar o processo, conferindo se este está livre de erros lógicos, isto é, se executa o pretendido, e validar as variáveis de entrada, certificando-se de que estas e as respetivas distribuições de probabilidade são uma representação credível do problema, ao comparar os valores gerados pelo modelo com os dados estatísticos registados.
- D. Realizar a simulação para se obter o conjunto de informações pretendidas, ou seja, o conjunto de variáveis de saída ou *output*, sendo necessário efetuar uma decisão fundamentada sobre os resultados.

## 5.3 Distribuição probabilística das variáveis

No presente caso, a simulação Monte Carlo usa como algoritmo o método de estimativa das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento do REH, descrito em 4.1.

Como *input* são usadas as variáveis relativas às características do clima representativo do território nacional bem como às características dos edifícios.

Os valores das variáveis são gerados aleatoriamente segundo uma distribuição normal, usando uma média e um desvio padrão. Estes são determinados a partir de dados estatísticos de estudos de especialistas.

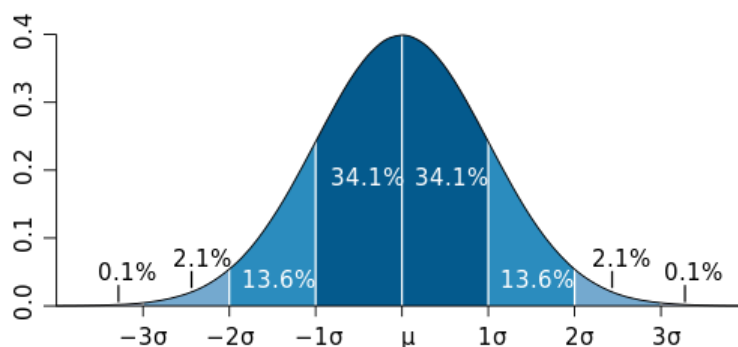


Figura 5 - Diagrama da distribuição normal

A partir da Figura 5 é possível visualizar a representação de uma distribuição normal, ou gaussiana, num diagrama. A média ( $\mu$ ) está no centro do diagrama e representa o valor que ocorre com mais frequência. A variação ou dispersão do valor da variável em relação à média é representada pelo desvio padrão ( $\sigma$ ). Pelo diagrama da Figura 5 é assim possível deduzir que quanto menor for o valor do desvio padrão, mais próximos da média estarão os dados. Um desvio padrão com um valor mais alto corresponde a uma maior dispersão de dados ao longo da gama de valores.

Para esta simulação, pretendida no presente âmbito, interessa mais usar este tipo de distribuição que os outros porque pretende-se obter uma média dos *outputs*, como se tratasse de um caso “típico” de uma habitação portuguesa. Para isso, são necessários valores “típicos” de *input* sem que se perca a natureza aleatória da geração dos seus valores, daí ser útil e apropriada usar um conjunto de valores segundo uma distribuição normal.

#### 5.4 Algoritmo do REH

A simulação de Monte Carlo é efetuada em ambiente Matlab, tendo como modelo conceptual ou algoritmo o método descrito em 4.1. No entanto, tal como está, é necessário discriminar vários parâmetros específicos a cada edifício. Desta maneira, é complicado englobar cada uma destas variáveis no código Matlab, havendo, assim, maior tendência ao erro e à sua propagação. Além da grande quantidade de parâmetros, existem certas condições, como o número e orientação das fachadas dos edifícios, que são difíceis de especificar.

De modo a simplificar a determinação das necessidades nominais de energia útil para períodos de aquecimento e de arrefecimento, através de uma simulação de Monte Carlo, é necessário adaptá-la tendo em conta determinados pressupostos que tornam a simulação mais eficiente, os quais, estão, na

sua maioria, relacionados com as características do edifício ou fração autónoma, conforme descrito nos parágrafos seguintes.

#### 5.4.1 Número de fachadas e sua orientação

O número de fachadas e a sua orientação, bem como a existência da cobertura que o edifício ou fração autónoma possui, são gerados aleatoriamente. Para cada orientação, é gerado um número que pode tomar o valor 0 ou 1. Caso seja 0, a fachada não existe nessa orientação, se for gerado 1, existe. As fachadas podem ter como orientação Norte, Nordeste, Este, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste.

No entanto, tipicamente, o edifício tem no máximo quatro fachadas, excluindo a cobertura. A escolha da orientação das fachadas é feita aleatoriamente através de um fator que pode tomar o valor 0 ou 1, sendo que com 0 o edifício pode ter as fachadas orientadas a Norte, Sul, Este e Oeste (ver Figura 6). Se o fator for 1, então as fachadas estão orientadas a Noroeste, Sudoeste, Nordeste e Sudeste (ver Figura 7). Isto resulta do facto de as fachadas de cada habitação serem perpendiculares entre si.

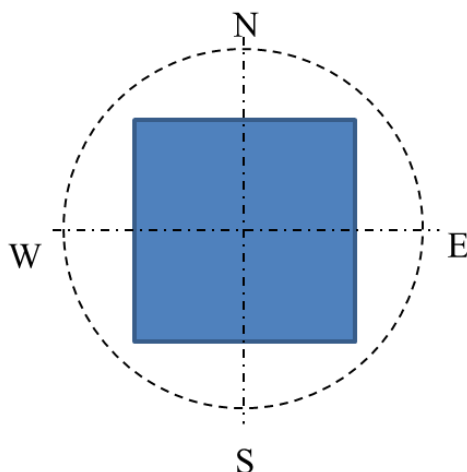


Figura 6 - Esquema da orientação das 4 fachadas de um edifício com o fator igual a 0.

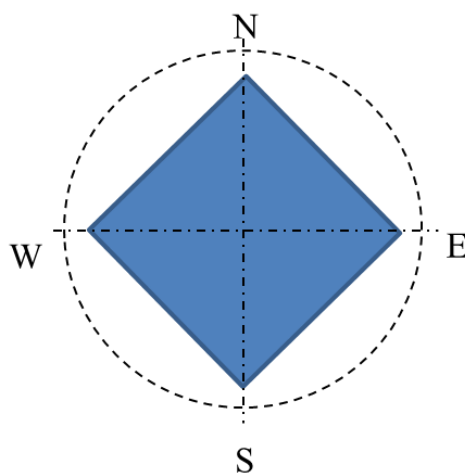


Figura 7 - Esquema da orientação das 4 fachadas de um edifício com o fator igual a 1.

A Figura 6 e a Figura 7 esquematizam os dois cenários das orientações das fachadas, em que o edifício, visto de cima, é o objeto azul e as direções Norte, Sul, Este e Oeste correspondem a azimutes. Apenas podem ocorrer estes esquemas de fachadas porque é pouco comum a existência de um edifício com fachadas cuja orientação, por exemplo, é de Sul e Sudeste, daí se considerarem somente estes os dois cenários possíveis.

#### 5.4.2 Área de pavimento, número de pisos e área de cobertura

Dependendo do valor da área de pavimento útil, é possível considerar que o alojamento possui mais do que um piso a partir de uma determinada área. Por exemplo, com uma área de pavimento útil acima dos 150 m<sup>2</sup> é razoável assumir que se trata de uma habitação com dois pisos.

Os valores limite de área de pavimento útil para cada piso consideram-se que são os valores da Tabela 3.

Tabela 3 - Valores limite de área de pavimento, em m<sup>2</sup>, para cada número de pisos, por alojamento.

N.º de pisos	1	2	3
Critério	$A_p \leq 150$	$150 < A_p \leq 300$	$A_p > 300$

A área da cobertura é igual à área de pavimento útil de cada piso. Considera-se que a área de cada piso é o quociente entre a área total de pavimento e o número de pisos.

#### 5.4.3 Dimensões das fachadas

As dimensões de cada fachada, nesta simulação, dependem da área de pavimento útil por piso. Tendo em conta que cada alojamento tem no máximo quatro fachadas, o comprimento de cada parede resulta de uma raiz quadrada da área de pavimento por piso, ajustada por um fator geométrico. Segundo o esquematizado nas Figura 6 e Figura 7, o limite exterior da planta da habitação tem uma forma de um paralelogramo, não sendo necessário ter todos os lados iguais, ou seja, tanto pode ser um quadrado como um retângulo. Esta forma será determinada através de um fator geométrico, gerado aleatoriamente dentro de um intervalo de valores. Estes valores poderão variar dependendo daquilo que for considerado razoável para o comprimento máximo e mínimo de cada fachada.

O comprimento de fachada pode ser determinado usando as seguintes expressões:

$$l_{13} = \sqrt{A_{p,piso} * f_{geo}} \quad (36)$$

$$l_{24} = \frac{\sqrt{A_{p,piso}}}{f_{geo}} \quad (37)$$

Onde  $l_{13}$  e  $l_{24}$  correspondem ao comprimento de cada par de fachadas opostas com o mesmo comprimento, em metros, e  $A_{p,piso}$  a área de pavimento útil por piso, em  $m^2$ . Neste caso, o fator  $f_{geo}$  é o fator geométrico gerado aleatoriamente entre 0,6 e 1,7.

Pode-se considerar o paralelogramo da Figura 6 como o paralelogramo de referência e dependendo do fator geométrico, o pavimento poderá ter três formas. A Figura 8 representa um piso ajustado por um fator menor que 1 e a Figura 9 ajustada por um fator maior que 1.

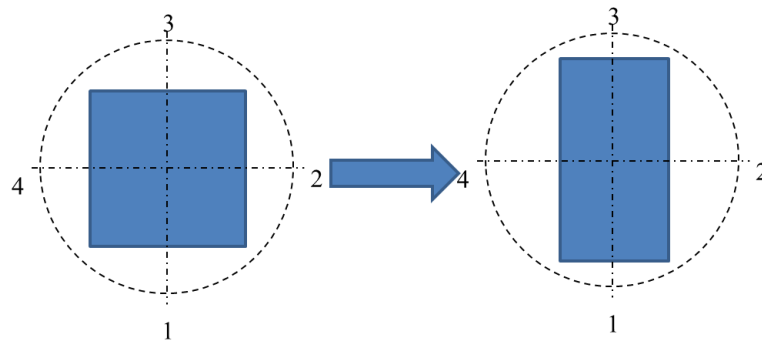


Figura 8 - Forma do piso antes e depois do ajuste com um fator geométrico menor que 1.

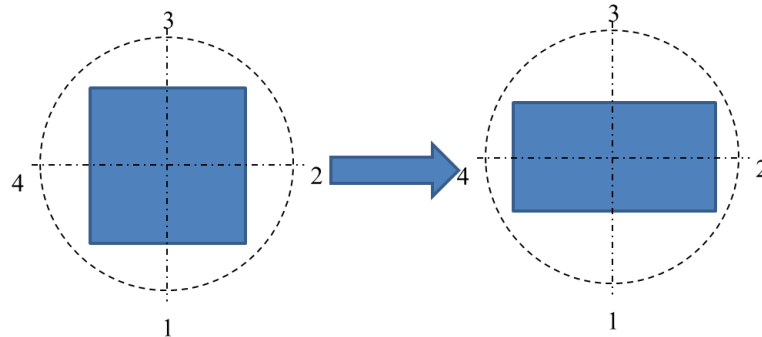


Figura 9 - Forma do piso antes e depois do ajuste com um fator geométrico maior que 1.

Quando o fator geométrico é igual a 1, a forma do piso mantém-se.

A altura das fachadas resulta do produto entre o número de pisos e o pé direito da respetiva habitação. Para efeitos do presente cálculo, a espessura dos elementos horizontais que separam os andares de cada habitação (chão ou teto, dependendo da perspetiva) é desprezável na determinação da altura da fachada.

#### 5.4.4 Coeficiente global de transferências de calor

Analisando o cálculo descrito pelo REH, conclui-se que é possível englobar as perdas por transmissão e as perdas por ventilação usando um coeficiente global de transferência de calor ( $H_T$ ). Pelas equações (2) e (7), podemos ver que as metodologias aplicadas no cálculo do coeficiente de transferência de

calor de cada componente, em que ocorrem perdas, são análogas. Assim, se considerarmos todas as perdas podemos definir um coeficiente  $H_T$  que engloba todas as transferências de calor por transmissão, bem com as perdas lineares, tudo em  $W/^\circ C$ :

$$H_T = H_{tr} + H_{ve} \quad (38)$$

Desta maneira, não será necessário discriminar cada componente em que ocorrem perdas por meio do uso de um parâmetro menos específico mas que engloba vários componentes: o coeficiente global de transferência de calor ( $H_T$ ). Este coeficiente engloba todas as transferências de calor por transmissão e ventilação de um edifício ou fração autónoma.

De notar que na equação (5), que determina o coeficiente de transferência de calor com os espaços não-úteis e com os espaços em contato com edifícios adjacentes, é aplicado um coeficiente de perdas ( $b_{tr}$ ). Para efeitos desta simulação de modo a simplificá-la, o coeficiente global de transferência de calor engloba este coeficiente de perdas.

#### 5.4.5 Perdas de calor na estação de aquecimento

Vendo a expressão (1), sabemos que as perdas de calor no Inverno englobam as perdas por transmissão através da envolvente dos edifícios ( $Q_{tr}$ ) e as perdas por ventilação ( $Q_{ve}$ ). As perdas através da envolvente dos edifícios englobam todas as perdas pelos elementos da envolvente, como paredes, envidraçados, cobertura e pavimentos, que estejam em contato com o exterior, com zonas não aquecidas e/ou com o solo. Pelas expressões (2) e (7) vemos que o cálculo do coeficiente de transferência de calor de cada componente apenas difere nos respetivos coeficientes de transmissão de calor.

Por ser necessário discriminar cada componente da envolvente no método das necessidades de energia no período de aquecimento, e pelo facto de o cálculo ser bastante similar, torna-se inevitável simplificar o cálculo. Esta simplificação é feita através de um único coeficiente global de transferência de calor que engloba todas as transferências de calor por transmissão mas também as transferências de calor por ventilação.

A determinação deste coeficiente está explicada em 5.4.4. Desta maneira, as perdas globais ( $Q_T$ ) são determinadas, de modo simplificado, pela expressão seguinte:

$$Q_T = Q_{tr} + Q_{ve} = 0,024.H_T.GD \quad (39)$$

No algoritmo o coeficiente a usar está normalizado pela área de pavimento.

#### 5.4.6 Perdas de calor na estação de arrefecimento

Ao analisar as expressões (25) e (27) é possível concluir que, à semelhança do período de aquecimento, o cálculo das perdas de calor por transmissão e ventilação são análogas, apenas o coeficiente de transferência de calor difere. Desta maneira, em vez de discriminar cada componente em que ocorrem perdas, aglutinam-se todos os respetivos num só usando o coeficiente global de transferência de calor do capítulo 5.4.4.

Assim as perdas globais do período de arrefecimento são determinadas pela seguinte expressão

$$Q_{p,v} = H_T \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot \frac{L_v}{1000} \quad (40)$$

#### 5.4.7 Ganhos de fontes internas

Por se tratar de uma simulação para a determinação das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento em edifícios residenciais, o ganho interno médio toma o valor 4 W/m<sup>2</sup> quer para o Inverno quer para o Verão.

#### 5.4.8 Ganhos solares na estação de aquecimento

O cálculo dos ganhos solares no Inverno depende do tipo da envolvente exterior não opaca, da sua área, de elementos de obstrução à radiação solar e de dispositivos de proteção solar, como cortinas e estores. Sendo necessário englobar cada um destes elementos, a variedade das suas características leva a um nível de complexidade superior, pelo que é vantajoso realizar algumas simplificações.

A área efetiva de vão envidraçado,  $A_{s,i}$ , definida pela expressão (15), depende de vários fatores: a área do vão envidraçado  $A_w$ , a fração envidraçada,  $F_g$  e o fator solar  $g_i$ .

Pode-se considerar que a área do vão envidraçado ( $A_w$ ) tem grande influência nos ganhos solares e varia de habitação para habitação. Mesmo em cada habitação, a área pode variar conforme a orientação da fachada. Tendo em conta vários estudos sobre as características do parque edificado nacional, é possível realizar uma aproximação, em que se considera que a proporção entre a área de vão envidraçado e a área da fachada, apenas varia com a orientação, sendo que estas proporções se mantêm de edifício para edifício. Os valores das proporções entre a área do vão envidraçado e a área da fachada, para uma determinação orientação, estão na Tabela 9.

A fração envidraçada,  $F_g$ , depende das características do vão e da caixilharia, que não são discriminadas na simulação de Monte Carlo. Para este efeito, usa-se uma média dos valores tabelados na Tabela 31 (no ANEXO B), no valor de 0,68. O fator solar,  $g_i$ , é determinado com a expressão (46) (ANEXO B) e o seu valor depende de certas características que estão relacionadas com o tipo de vidro usado e, à semelhança da fração envidraçada, não são discriminadas na simulação. Desta maneira, para



o  $g_{\perp,vi}$  faz-se uma média dos valores tabelados na Tabela 32 (no ANEXO B), tomando o valor 0,55, enquanto  $F_{w,i}$  toma o valor 0,9.

O fator de obstrução de vãos envidraçados do período de aquecimento ( $F_{s,i}$ ), é determinado usando a equação (41) (em ANEXO B), que depende de três fatores de obstrução: o fator relativo aos elementos exteriores ao edifício ( $F_h$ ), o fator relativo aos elementos horizontais do edifício ( $F_o$ ) e o fator relativo aos elementos verticais do edifício ( $F_f$ ). Como estes fatores variam conforme a orientação e o ângulo que é formado entre o centro do vão e a extremidade do elemento obstrutivo, na simulação em Matlab é utilizado um valor do  $F_{s,i}$  que resulta do produto da média de cada fator, por orientação (Tabela 4).

Tabela 4 – Média do fator de obstrução de vãos envidraçados da estação de aquecimento, por orientação.

	H	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
$F_{s,i}$	0,85	1,00	0,77	0,58	0,50	0,45	0,50	0,58	0,77

#### 5.4.9 Ganhos solares na estação de arrefecimento

Na estação de arrefecimento, os ganhos solares pelo vão envidraçado são determinados através da uma abordagem semelhante à da estação de aquecimento [expressão (21)]. A área efetiva coletora de radiação é calculada da mesma maneira que na estação de aquecimento, em que resulta do produto do fator de sombreamento do horizonte com a área útil do elemento coletor de radiação ( $F_{s,v} \cdot A_{s,v}$ ), para a estação de arrefecimento.

Da mesma maneira que no Inverno se utilizam os valores médios de cada fator, no Verão aplica-se a mesma metodologia. Sendo que no caso da área útil do elemento envidraçado, o fator  $F_{w,v}$  a usar, por orientação, consiste nos valores da Tabela 34 (no ANEXO B). Para o fator solar do vidro ( $g_v$ ), determinado com a equação (43) do ANEXO B, aplica-se a mesma metodologia, já que existem muitas tipologias de vão envidraçados, sendo que a média por orientação se encontra na Tabela 5. Para o parâmetro  $I_{sol}$  utiliza-se uma média de todos os valores por orientação, na Tabela 7.

Tabela 5 - Média do fator solar e do fator de obstrução de vãos envidraçados da estação de arrefecimento, por orientação.

	H	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
$g_v$	0,31	0,51	0,42	0,36	0,33	0,33	0,33	0,36	0,42
$F_{s,v}$	1,00	0,97	0,76	0,70	0,64	0,63	0,64	0,70	0,76

No entanto, nos ganhos solares na estação de arrefecimento podem ser contabilizados os ganhos através da envolvente opaca [expressão (23)]. Apesar de ser opcional a inclusão nos ganhos solares na estação de arrefecimento, nesta simulação os ganhos pela envolvente opaca são contabilizados. Mais uma vez, devido à diversidade de casos para cada parâmetro, são usados os valores médios do

coeficiente de absorção da radiação solar ( $\alpha$ ) (Tabela 25 no ANEXO A), contabilizado em 0,6, e do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ), em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , (Tabela 23 no ANEXO A). No caso do coeficiente de transmissão térmica usa-se uma média para elementos verticais ( $0,60 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ), como é o caso das paredes, e uma média para elementos horizontais ( $0,85 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ), como a cobertura.

#### 5.4.10 Limites dos parâmetros gerados

Na geração aleatória, segundo uma distribuição normal, é de esperar que surjam valores negativos de certos parâmetros graças à sua média baixa e/ou desvio padrão relativamente elevado. Nesta simulação, todos os parâmetros não podem ter valores negativos, porque constituiria um erro, como é o exemplo da área de pavimento. Pode ocorrer também que o valor gerado seja excessivo pelo que não é plausível que se possa verificar. Por exemplo, uma temperatura média do ar exterior gerada ser maior que  $70^\circ C$  é fisicamente pouco expectável. Nestas situações é necessário estabelecer limites na geração dos valores. Assim, cada valor do parâmetro que esteja fora do intervalo das possibilidades é removido da distribuição dos dados de cada parâmetro, de maneira que todos os vetores terão o valor correspondente também removido.

#### 5.4.11 Perdas de calor por transmissão de referência

O cálculo das perdas de calor por transmissão de referência da estação de aquecimento ( $Q_{tr,i_{ref}}$ ) é bastante semelhante ao cálculo das perdas de calor por transmissão das necessidades nominais ( $Q_{tr,i}$ ), descrito pela equação (2). No entanto, tal como também para o caso das necessidades nominais, existem demasiados componentes e coeficientes a diferenciar, pelo que é necessário fazer aproximações. Assim, o coeficiente de transferência de calor por transmissão de referência ( $H_{tr,ref}$ ) resultada da seguinte equação:

$$H_{tr,ref} = (A_{op,horizontal} \cdot U_{ref,horizontal} + A_{op,vertical} \cdot U_{ref,vertical} + A_W \cdot U_{ref,zona}) \quad (41)$$

Em que  $A_{op,horizontal}$  é a área dos elementos horizontais da envolvente opaca, como cobertura, em  $m^2$ ,  $U_{ref,horizontal}$  é a média dos coeficientes de transmissão térmica de referência de elementos opacos horizontais ( $0,85 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ),  $A_{op,vertical}$  é a área dos elementos verticais da envolvente opaca, em  $m^2$ ,  $U_{ref,vertical}$  é a média dos coeficientes de transmissão térmica de referência de elementos opacos verticais ( $0,60 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ),  $A_W$  é a área total do envidraçado, em  $m^2$ , e  $U_{ref,zona}$  é o coeficiente de transmissão térmica de referência por zona climática, em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

## 5.5 Variáveis de entrada

Tendo em conta as condições e simplificações da metodologia do REH, os parâmetros essenciais a gerar aleatoriamente podem ser incluídos em duas categorias: os parâmetros característicos do clima em território nacional e os parâmetros característicos do parque residencial.

### 5.5.1 Parâmetros característicos do clima em território nacional

#### Número de Graus Dias para aquecimento – $GD$

O número de Graus Dias do período de aquecimento, é uma medida que reflete a quantidade de energia necessária para aquecer um edifício, sendo que é derivado da temperatura do ar exterior. De certa maneira, resulta do somatório das diferenças positivas registadas entre uma dada temperatura base e a temperatura exterior durante o período em estudo. Em Portugal, correspondendo à estação de aquecimento, o número de Graus Dias tem como base a temperatura de 18°C. O valor varia conforme a região do país e a altitude da localidade.

A Tabela 6 apresenta a média e o desvio padrão dos valores de  $GD$ , em °C.dias.

#### Duração da estação de aquecimento – $M$ (Tabela 6)

O parâmetro  $M$  representa a duração da estação de aquecimento, em meses, e varia conforme a região do país. A Tabela 6 apresenta a média e o desvio padrão de  $M$ .

#### Energia solar média - $G_{sul}$ (Tabela 6)

$G_{sul}$  representa o valor médio mensal da energia solar incidente numa superfície orientada a sul durante a estação de aquecimento, em kWh/m<sup>2</sup>, e varia conforme a região do país. A Tabela 6 indica o valor médio e a o respetivo desvio padrão.

#### Temperatura exterior média - $\theta_m$ (Tabela 6)

O parâmetro  $\theta_m$  corresponde à temperatura exterior média durante a estação de arrefecimento, em graus celsius °C, e varia conforme a região do país. O seu valor médio e respetivo desvio padrão estão indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Média e desvio padrão de alguns parâmetros característicos do clima em território nacional. Os valores destes parâmetros para cada região podem ser consultados na Tabela 16 e na Tabela 17 do ANEXO A.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
GD (°C.dias)	1362	340
M (meses)	6,0	1,2
$G_{sul}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	138	11
$\theta_{m,extv}$ (°C)	21,9	1,4

### Energia solar incidente em cada orientação - $I_r$ (Tabela 7)

Este parâmetro corresponde à energia solar acumulada, durante a estação de arrefecimento, incidente na horizontal (inclinação 0°), ou seja, na cobertura, e em superfícies verticais (inclinação 90°) para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais, em kWh/m<sup>2</sup>. Na Tabela 7 estão indicados a média e desvio padrão deste parâmetro para cada orientação.

Tabela 7 - Média e desvio padrão da intensidade da radiação incidente para cada orientação. Os valores de cada região podem ser consultados na Tabela 17 do ANEXO A.

	$I_{solar}$ (kWh/m <sup>2</sup> ) acumulados de Junho a Setembro								
	0° Cobertura	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SW	90° W	90° NW
Média	809	221	352	487	484	407	484	487	352
Desvio Padrão	57	7	23	38	37	41	37	38	23

## 5.5.2 Parâmetros característicos do parque residencial

### Área útil de pavimento - $A_p$

A área útil de pavimento define-se como a soma das áreas medidas pelo perímetro interior das paredes de todos os compartimentos de uma fração autónoma de um edifício. A média e o desvio padrão da área de pavimento encontram-se indicados na Tabela 8.

### Pé direito médio - $P_d$

O pé direito é a altura média, medida pelo interior, entre o pavimento e o teto de uma fração autónoma de um edifício. A sua média e desvio padrão estão indicados na Tabela 8.

### **Coefficiente global de transferência de calor por unidade de área- $\hat{H}_T$**

O coeficiente global de transferência de calor, que engloba as transferências de calor em todos os componentes onde ocorrem perdas, junta todos estes parâmetros num só. No entanto, nesta simulação está expresso por unidade de área ( $\hat{H}_T$ ), ou seja, em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ . O valor médio e respetivo desvio padrão estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8 - Média e desvio padrão de certos parâmetros. Os valores de cada caso podem ser consultados na Tabela 18 do ANEXO A.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
$A_p (m^2)$	109	38
$P_d (m)$	2,64	0,21
$\hat{H}_T$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	2,86	1,10

### **Rácio entre a área de uma fachada e a área do envidraçado - $\frac{A_w}{A_f}$**

A área de vãos envidraçados consiste em toda a área, medida pelo interior, dos elementos não opacos da envolvente de um edifício e os respetivos caixilhos. O rácio entre a área do vão envidraçado e a área de fachada consiste no quociente entre a área do vão envidraçado e a área da fachada o que, ao fim e ao cabo, representa a proporção de vão envidraçado existente numa certa fachada. O rácio difere de fachada para fachada, conforme a sua orientação. O valor médio do rácio está indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Valor médio de  $A_w/A_f$  para cada orientação. Os valores de cada caso de orientação podem ser consultados na Tabela 21 do ANEXO A

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
0,28	0,33	0,36	0,31	0,22	0,12	0,17	0,28

## 6. Resultados

A partir dos dados adquiridos sobre as características do clima e do parque habitacional em estudo, foi possível gerar os parâmetros a usar na simulação de modo a ser possível aplicar o método de Monte Carlo. Os parâmetros gerados são considerados o *input* da simulação e os parâmetros resultantes da mesma como as necessidades energéticas, ganhos e perdas de calor são os parâmetros de *output*. Os dados obtidos resultaram de uma simulação com 100000 iterações, conforme as tabelas do ANEXO C.

### 6.1 Variáveis de entrada

As variáveis de entrada ou parâmetros de *input* da simulação dividem-se em duas categorias: os parâmetros característicos do clima em território nacional e os parâmetros característicos do parque residencial. Os histogramas a seguir apresentados resultam numa geração de valores após a aplicação das condições e pressupostos nos dados estatísticos, tal como explicado em 5.4.

#### 6.1.1 Parâmetros característicos do clima em território nacional

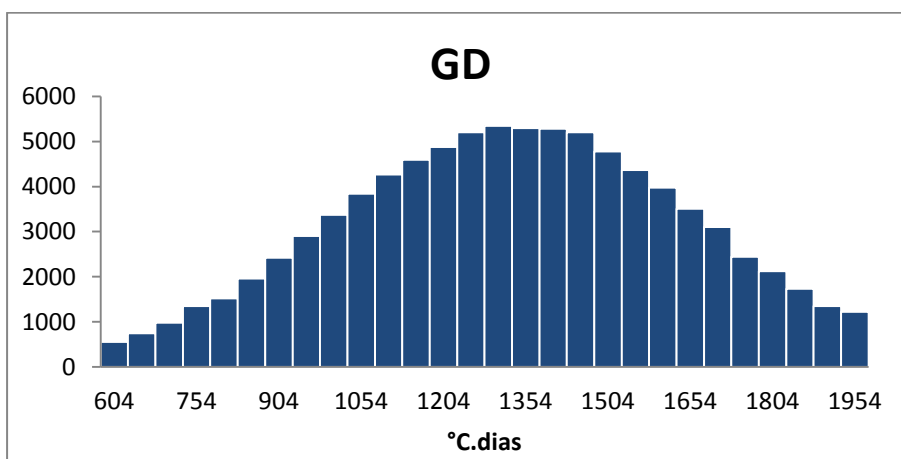


Gráfico 25 - Histograma com os valores de graus-dias gerados.

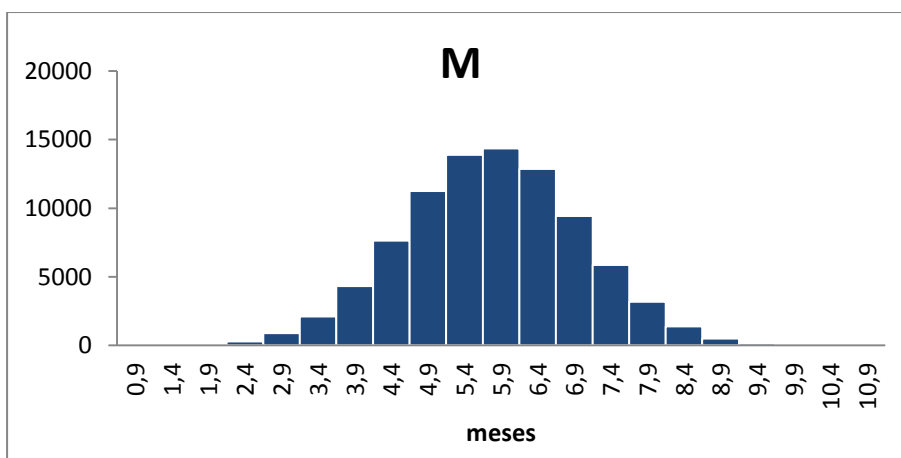


Gráfico 26 - Histograma com os valores gerados da duração da estação de aquecimento.

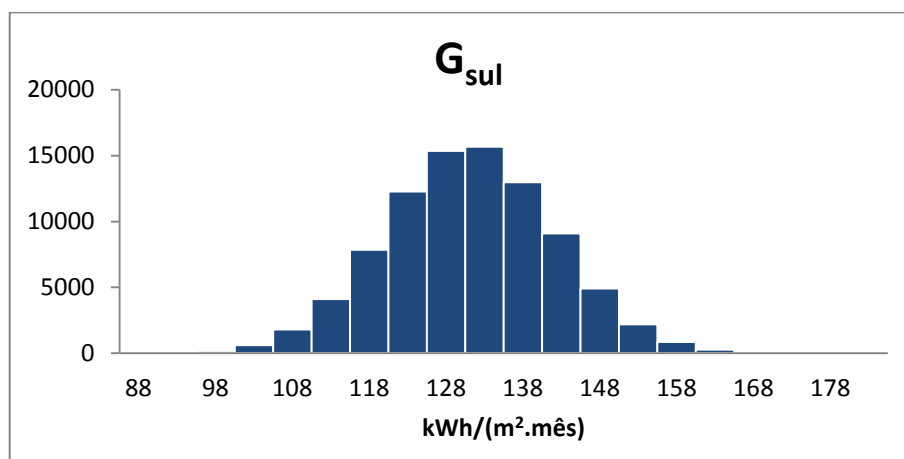


Gráfico 27 - Histograma com os valores gerados da energia sola média incidente numa superfície orientada a sul.

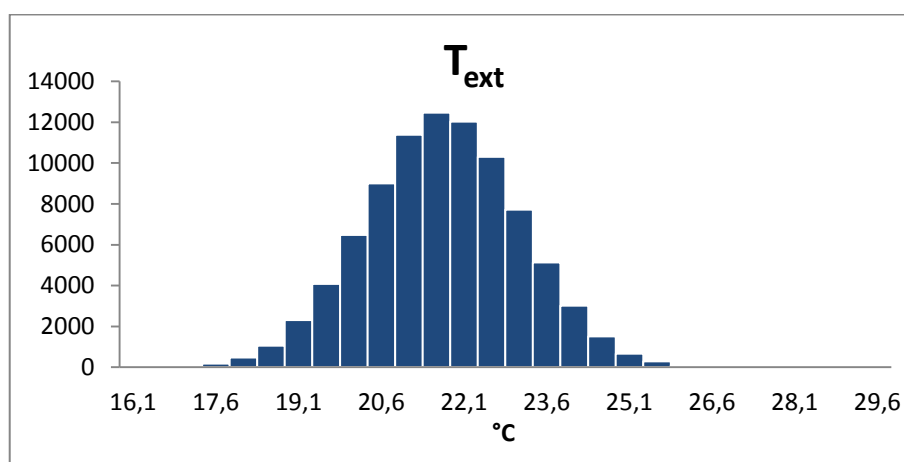


Gráfico 28 - Histograma com os valores gerados da temperatura média exterior, durante a estação de arrefecimento.

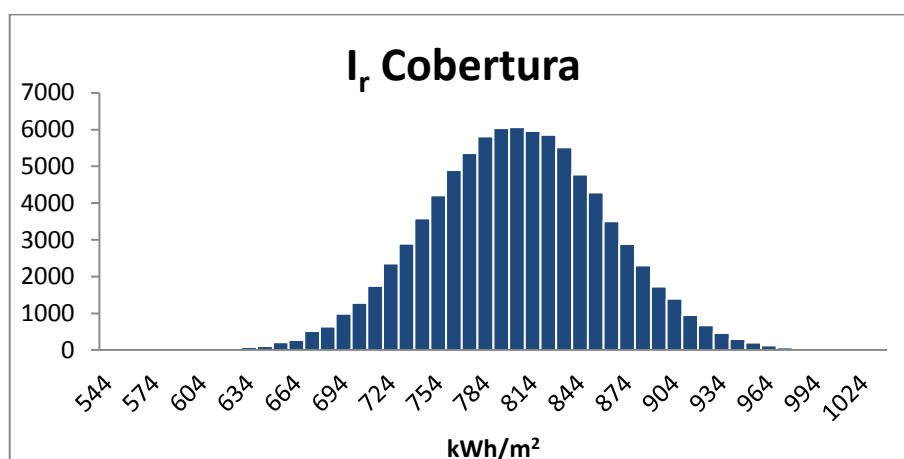


Gráfico 29 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa cobertura.

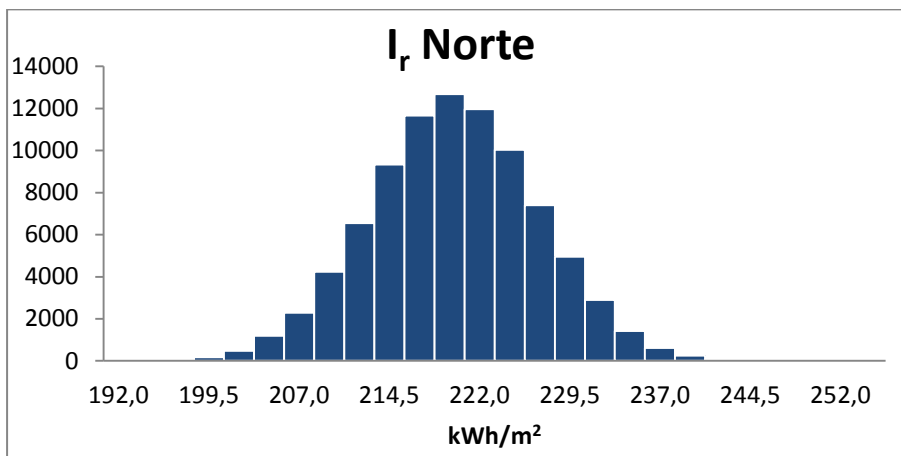


Gráfico 30 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Norte.

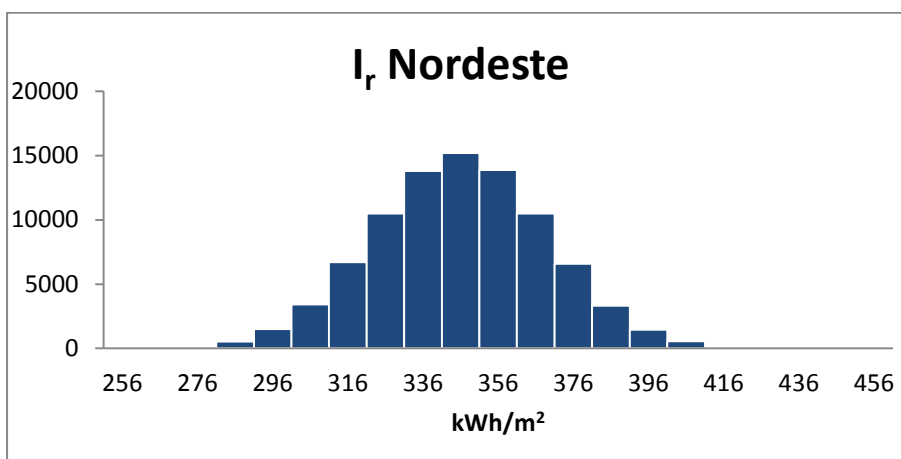


Gráfico 31 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Nordeste.

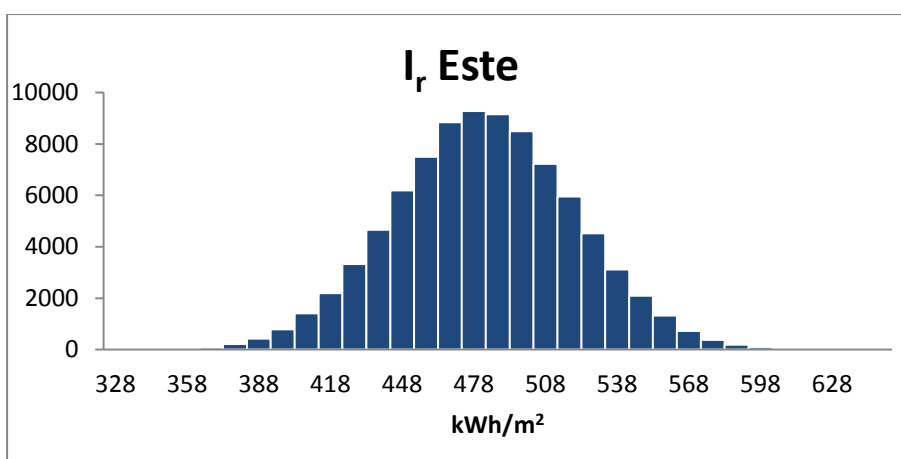


Gráfico 32 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Este.



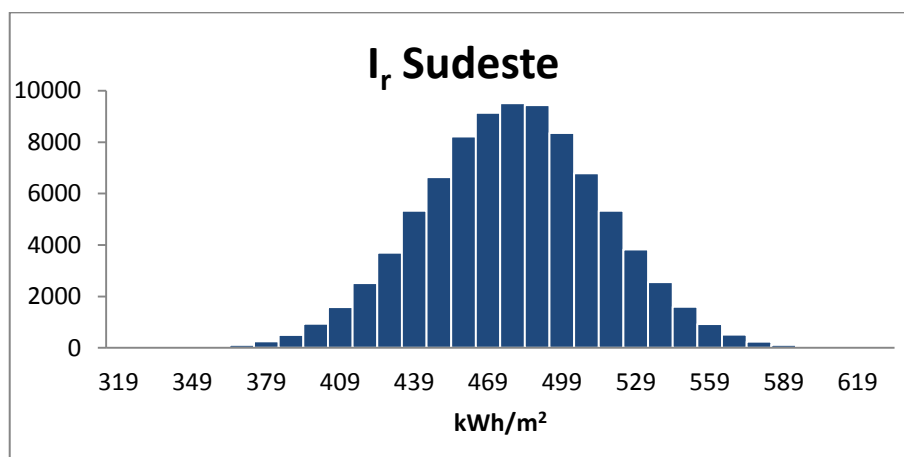


Gráfico 33 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Sudeste.

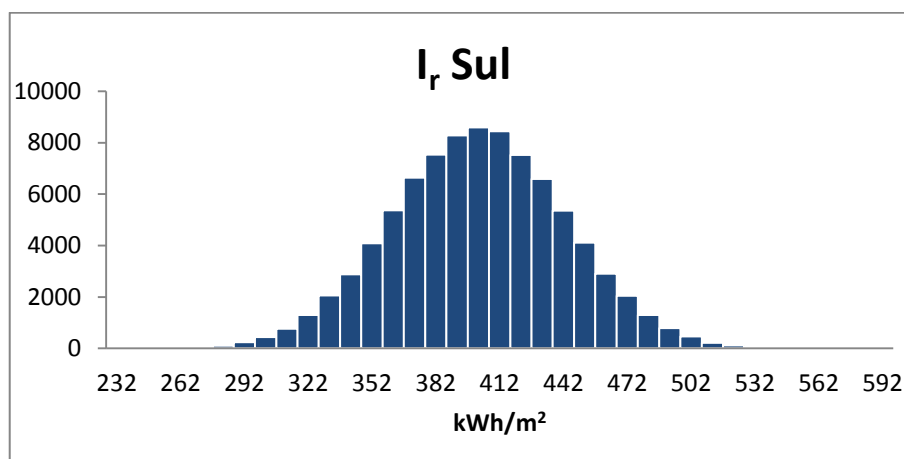


Gráfico 34 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Sul.

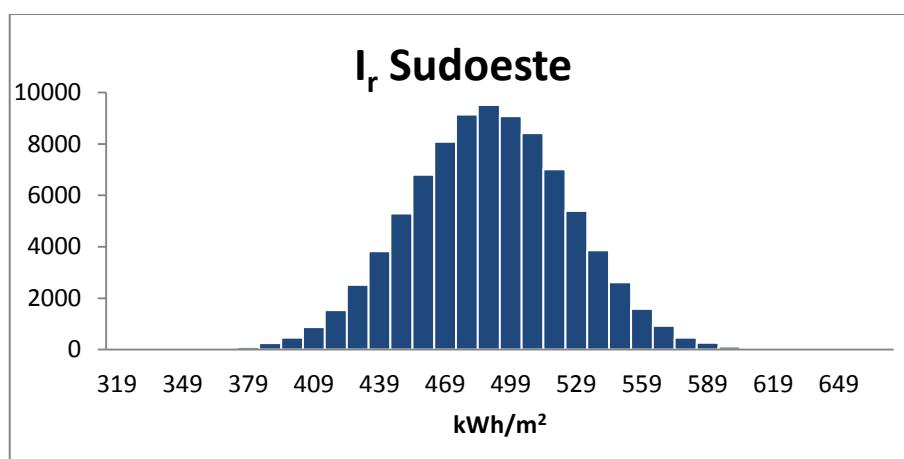


Gráfico 35 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Sudoeste.

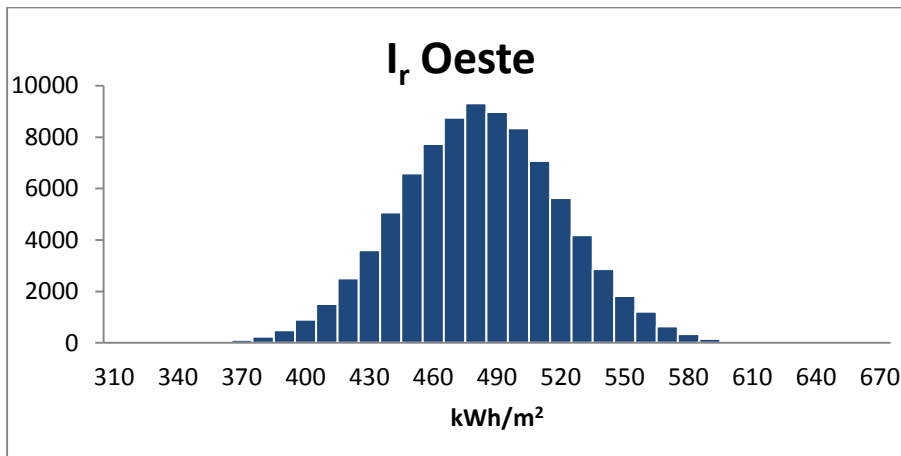


Gráfico 36 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Oeste.

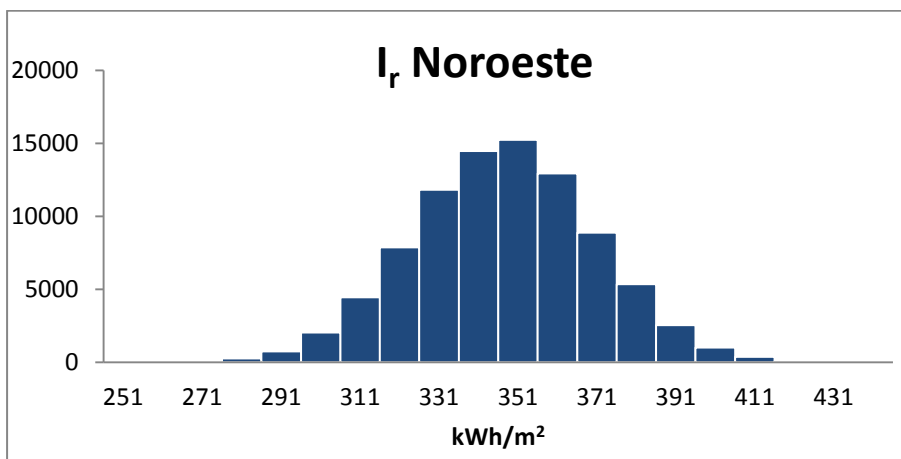


Gráfico 37 - Histograma com os valores gerados com a energia solar incidente numa fachada virada a Noroeste.

### 6.1.2 Parâmetros característicos do parque residencial

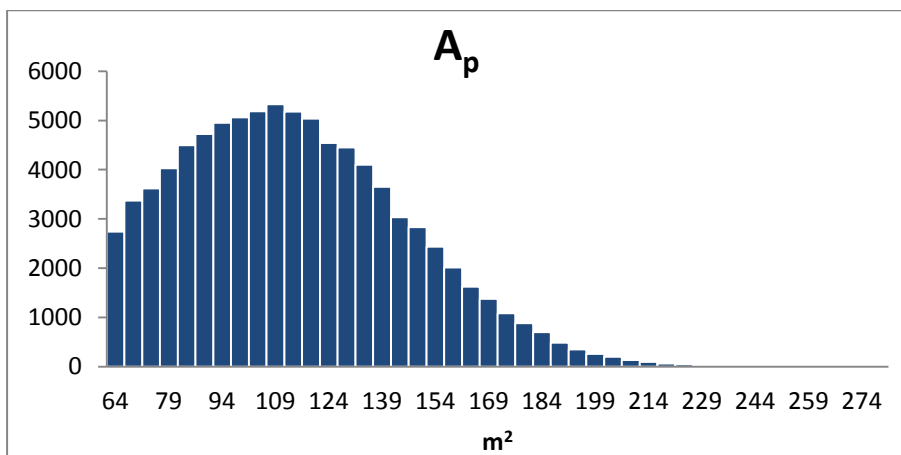


Gráfico 38 - Histograma com os valores gerados da área de pavimento útil em m².

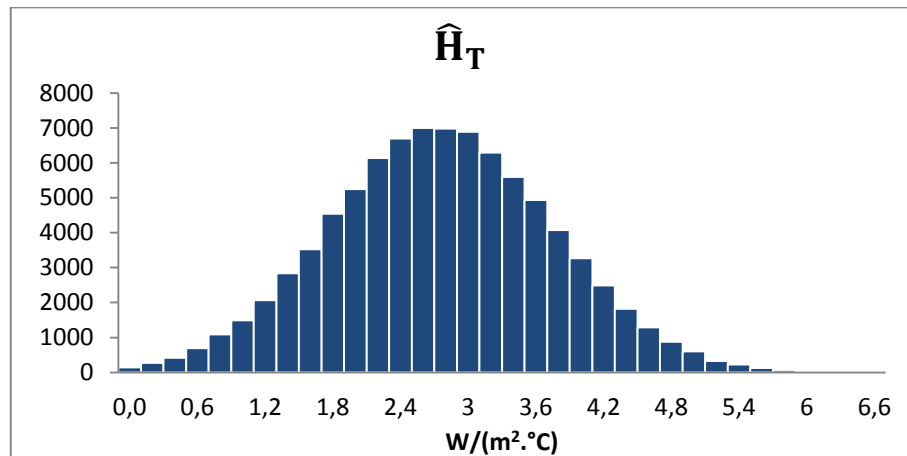


Gráfico 39 - Histograma com os valores gerados do coeficiente global de transferência de calor.

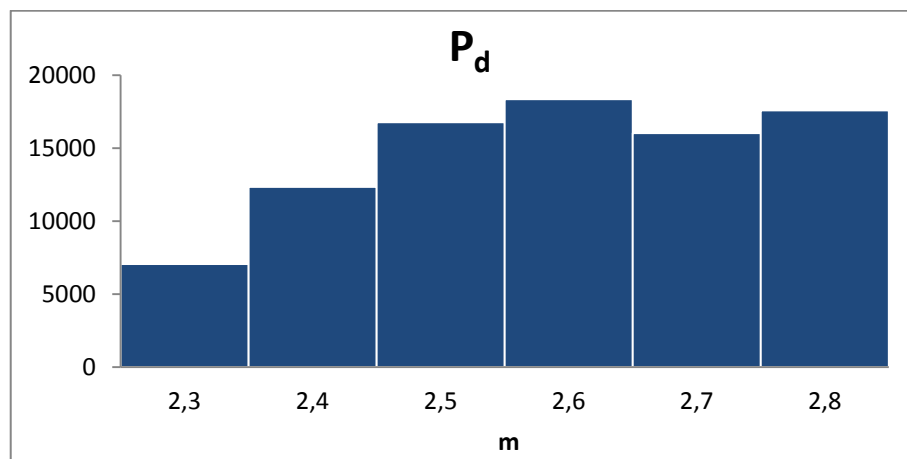


Gráfico 40 - Histograma com os valores gerados de pé direito médio da habitação.

## 6.2 Variáveis de saída

As variáveis de saída ou parâmetros de *output* da simulação consistem nas distribuições de frequência resultantes do cálculo descrito em 4. Estes parâmetros são os ganhos e perdas de calor de ambas as estações, sendo que os valores das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento dependem de tais parâmetros.

### 6.2.1 Estação de aquecimento

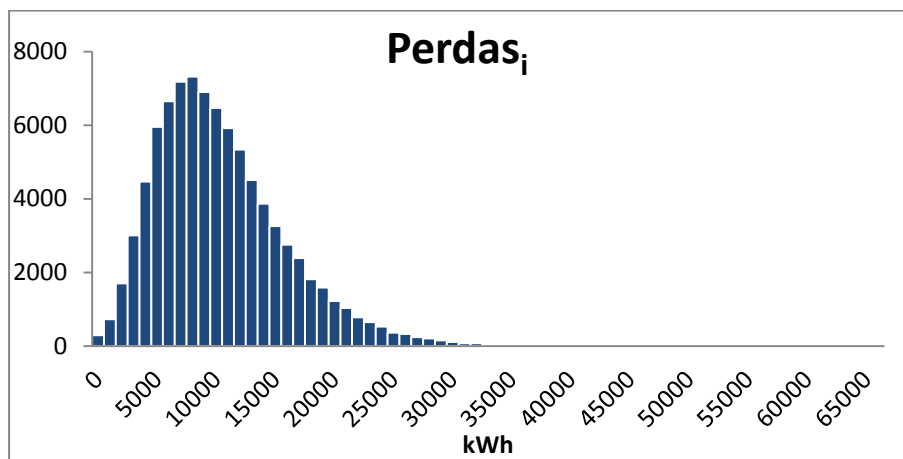


Gráfico 41 - Histograma com os valores calculados das perdas de calor na estação de aquecimento.

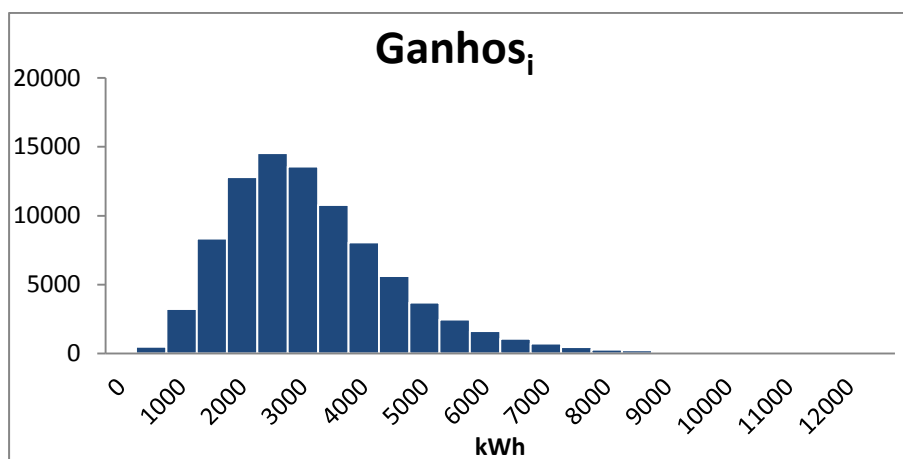


Gráfico 42 - Histograma com os valores calculados dos ganhos de calor na estação de aquecimento.

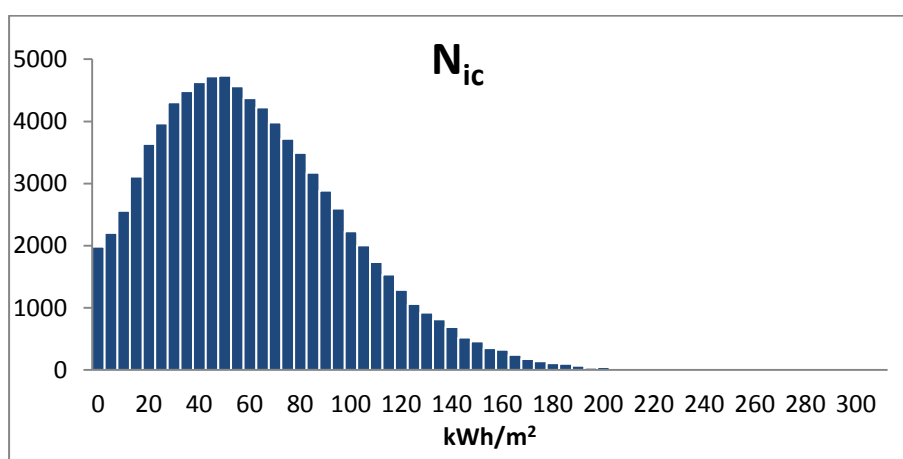


Gráfico 43 - Histograma com os valores calculados das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento.

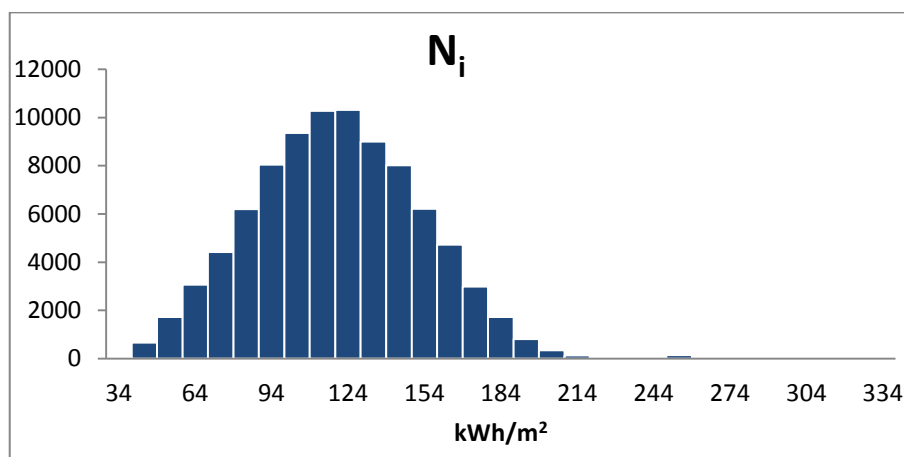


Gráfico 44 - Histograma com os valores obtidos do limite anual das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.

## 6.2.2 Estação de arrefecimento

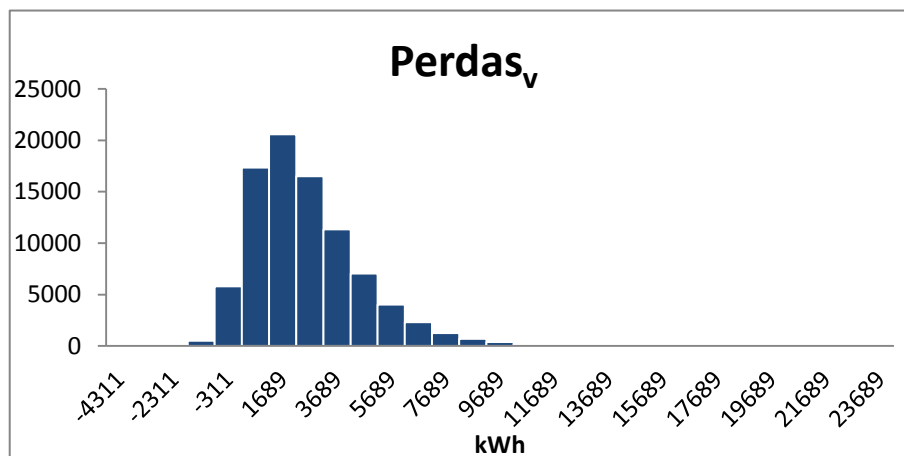


Gráfico 45 - Histograma com os valores calculados das perdas de calor na estação de arrefecimento.

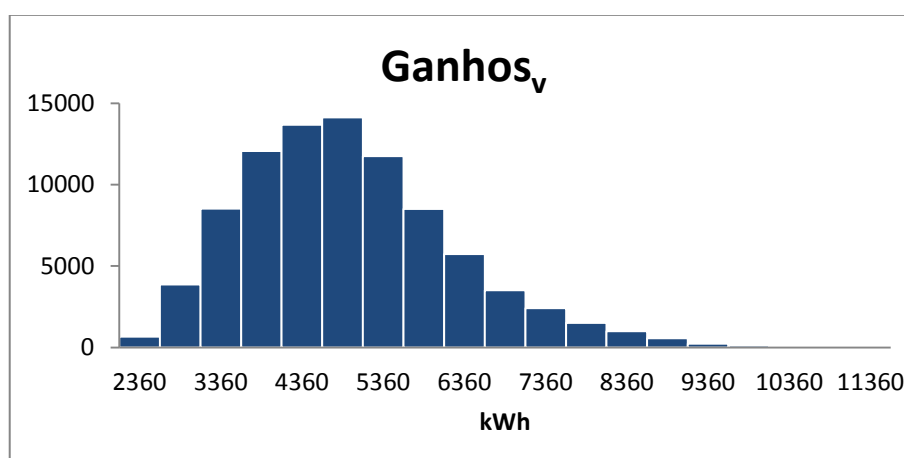


Gráfico 46 - Histograma com os valores calculados dos ganhos de calor na estação de arrefecimento.

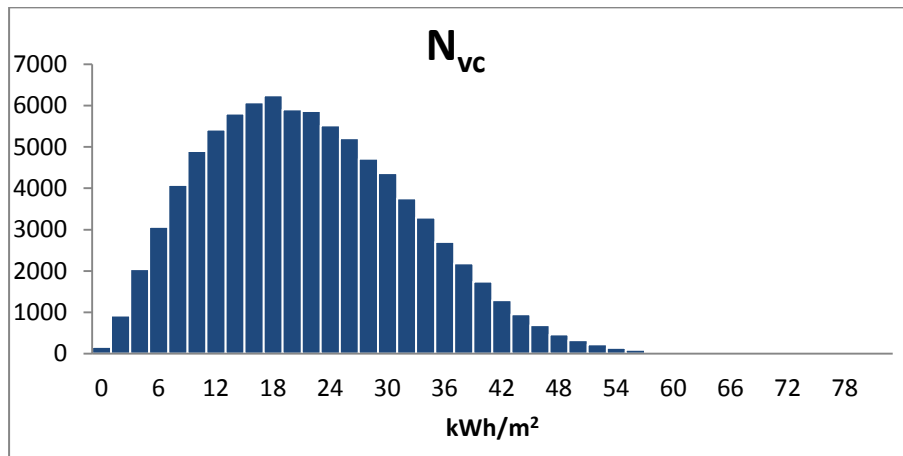


Gráfico 47 - Histograma com os valores calculados das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento.

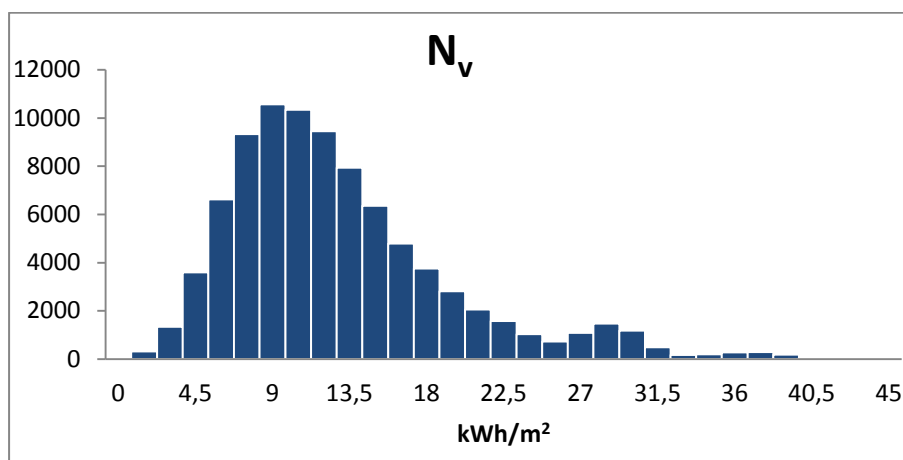


Gráfico 48 - Histograma com os valores calculados do limite das necessidades nominais anuais de energia útil para o arrefecimento.

## 7. Discussão

No capítulo anterior é possível observar as distribuições de frequência dos parâmetros de *input* e de *output*. Os parâmetros de *input* consistem nos parâmetros gerados, segundo uma distribuição normal com uma média e desvio padrão definidos a partir de dados estatísticos recolhidos por especialistas e em inquéritos e censos. Os parâmetros de *output* consistem numa distribuição normal de valores, que foram obtidos com a simulação de Monte Carlo.

### 7.1 Parâmetros de *input*

Na Tabela 10 e na Tabela 11 estão os valores médios de cada parâmetro de *input* gerado e a intensidade da radiação para cada orientação, respetivamente.

Tabela 10 - Média dos parâmetros gerados.

Parâmetro	Média
GD (°C.dias)	1351
M (meses)	6
G <sub>sul</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	138
$\theta_{m,extv}$ (°C)	21,9
A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	118
$\hat{H}_T$ (W/m <sup>2</sup> .°C)	2,87
P <sub>d</sub> (m)	2,6

Tabela 11 - Média dos valores gerados da intensidade da radiação incidente para cada orientação.

Região do país	I <sub>solar</sub> (kWh/m <sup>2</sup> ) acumulados de Junho a Setembro								
	0° Cobertura	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SW	90° W	90° NW
Média	809	221	352	487	484	407	484	487	352

Ao comparar a Tabela 10 com a Tabela 6 e com a Tabela 8 é possível verificar que as médias dos parâmetros gerados são diferentes das médias dos dados estatísticos. O mesmo acontece com a Tabela 11 e Tabela 7. A diferença entre a média dos valores apresentados nos histogramas e a média dos dados estatísticos resulta da simplificação descrita em 5.4, mais concretamente na limitação explicada em 5.4.10. Como é explicado, sempre que numa das distribuições existir um valor fora do intervalo de possibilidade, este é excluído dos resultados de forma a equilibrar a distribuição. Quando isto acontece, a média da respetiva distribuição é alterada.

O facto de a média das distribuições ter sido alterada influencia o valor das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento. Assim, esta diferença entre a média dos dados estatísticos e a média dos dados gerados propaga-se ao longo da simulação, pelo que o valor final dos índices não corresponde exatamente aos dados estatísticos. No entanto, esta diferença não é significativa pelo que se considera desprezável.

A área de pavimento útil, o número de graus-dias, a duração da estação de aquecimento, o coeficiente global de transferência de calor por unidade de área e o pé direito são os parâmetros que foram limitados pela condição de 5.4.10, ou seja, são os parâmetros cuja média foi alterada. Analisando os respetivos gráficos, apenas não é clara a sua aplicação na duração da estação de aquecimento porque a aplicação da condição apenas tem o fim de garantir que não seja negativo nem superior a 12 meses, já que é o número de meses que um ano possui. A distribuição da área útil de pavimento apenas está limitada inferiormente em  $64 \text{ m}^2$ , que é o valor mínimo registado. A distribuição do número de graus-dias está limitada inferior e superiormente em 604 e 2015 °C.dias porque são, respetivamente, o valor mínimo e o valor máximo registado. O mesmo acontece com o pé direito, em 2,3 e 3 metros. No caso do coeficiente global de transferência de calor apenas está limitado inferiormente por 0, já que esta variável não pode tomar um valor negativo.

## 7.2 Parâmetros de *output*

No caso dos parâmetros de *output*, é possível observar as distribuições obtidas do Gráfico 41 ao Gráfico 47. A média de cada distribuição está na Tabela 12.

Tabela 12 - Média dos parâmetros *output*.

Estação de aquecimento				Estação de arrefecimento			
Perdas <sub>i</sub> (kWh)	Ganhos <sub>i</sub> (kWh)	N <sub>ic</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	N <sub>i</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	Perdas <sub>v</sub> (kWh)	Ganhos <sub>v</sub> (kWh)	N <sub>vc</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	N <sub>v</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )
10920	3392	64	124	3061	5194	24	14

Em relação às perdas de calor, na estação de aquecimento tem uma média de 10920 kWh enquanto na estação de arrefecimento é de 3061 kWh (Gráfico 49). Esta grande diferença pode dever-se ao facto de, quer a duração da estação de aquecimento quer a diferença de temperatura entre o interior e o exterior, serem bastante maiores que no período de arrefecimento. Estes dois fatores levam a que a perda de calor na estação de aquecimento seja superior.

Os ganhos de calor, que englobam ganhos térmicos internos e ganhos solares, são como seria de esperar, superiores na estação de arrefecimento, contabilizando 5194 kWh, ao passo que no Inverno contabiliza 3392 kWh (Gráfico 49). Isto acontece porque a energia solar incidente é superior à do Inverno, além de que incide durante mais tempo durante o dia. No entanto, a diferença não é tão



grande como seria de esperar porque a estação de aquecimento tem maior duração que a de arrefecimento.

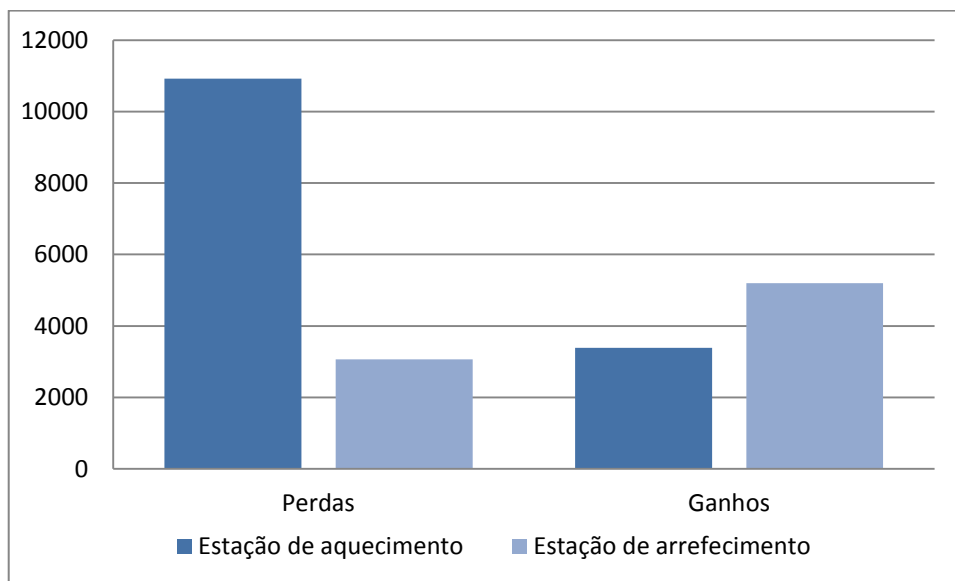


Gráfico 49 - Resultado das perdas e ganhos de calor para as estações de aquecimento e arrefecimento (kWh).

Os valores para os quais as necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento convergem são  $64 \text{ kWh/m}^2$  e  $24 \text{ kWh/m}^2$ , respetivamente. Tendo em conta os limites obtidos das necessidades anuais de energia útil para aquecimento e arrefecimento é possível verificar que no Inverno a energia necessária para o aquecimento respeita o limite, no entanto, no Verão a energia necessária para o arrefecimento é superior ao limite (Gráfico 50), o que leva a crer que a maioria das habitações em Portugal estão melhor preparadas para o Inverno do que para o Verão, pelo facto de serem minimamente eficientes a reter o calor nos dois períodos.

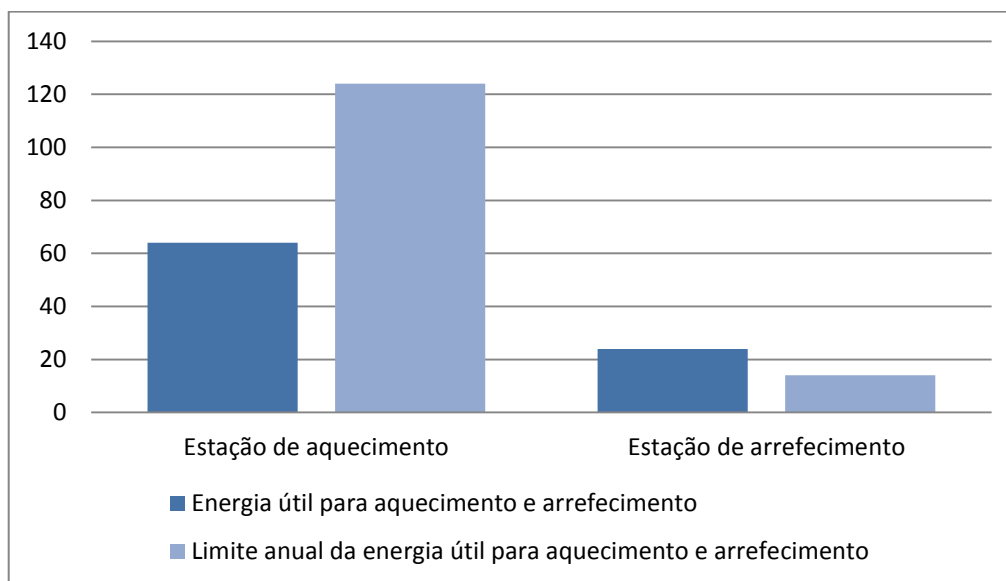


Gráfico 50 - Resultados das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento e os respetivos valores limites (kWh).

O desvio padrão das necessidades de energia útil para aquecimento e arrefecimento estão na Tabela 15. Analisando os seus valores, é possível verificar que 64,2% dos valores obtidos de  $N_{ic}$  estão

compreendidos entre os 26 e os 102 kWh/m<sup>2</sup>, em relação ao  $N_{vc}$  64,2% dos resultados têm valores compreendidos entre 13 e 35 kWh/m<sup>2</sup>.

A distribuição obtida é em ambos os casos do tipo normal, porém, assimétrica positiva. Isto pode ser explicado pelo facto de as variáveis de entrada terem a necessidade de serem positivas apesar de a sua distribuição possuir uma média e um desvio padrão que implicam valores negativos, no caso de a distribuição ser simétrica. Facto explicado em 7.1 pela limitação de certas variáveis de entrada, limitação essa que é descrita pela condição de 5.4.10.

Este comportamento assimétrico do  $N_{ic}$  pode ser verificado pela Tabela 13, a qual demonstra que quase 50 % dos valores obtidos estão compreendidos entre os 25 kWh/m<sup>2</sup> e os 74 kWh/m<sup>2</sup>, apesar de o mínimo ser 0 e o máximo ser pouco mais de 300 kWh/m<sup>2</sup>. Para o  $N_{vc}$ , o comportamento é o mesmo. Na Tabela 14, verifica-se que 63 % dos valores obtidos de  $N_{vc}$  estão compreendidos entre os 10 kWh/m<sup>2</sup> e os 29 kWh/m<sup>2</sup>, sendo que 0 é o mínimo e o máximo é pouco mais de 80 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabela 13 - Frequência relativa em percentagem dos valores do  $N_{ic}$ .

kWh/m <sup>2</sup>	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
$f_i$	15,279%	25,038%	24,778%	17,965%	9,957%	4,537%	1,762%	0,507%	0,148%	0,024%	0,002%	0,001%	0,001%

Tabela 14 - Frequência relativa em percentagem dos valores do  $N_{vc}$ .

kWh/m <sup>2</sup>	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$f_i$	11,628%	32,228%	30,818%	18,452%	5,822%	0,935%	0,096%	0,018%	0,003%

Comparando os valores de  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$  com dados recolhidos de casos reais (ver Tabela 15), vemos que a média de  $N_{ic}$  obtida pela simulação é bastante precisa, em relação à média dos casos reais (65 kWh/m<sup>2</sup>) e que a média do  $N_{vc}$  apresenta uma diferença em relação aos 11 kWh/m<sup>2</sup> obtidos em casos reais, o que leva a crer que ou os dados recolhidos são imprecisos ou existe alguma discrepância nos parâmetros calculados provocada pelo algoritmo da simulação. Esta discrepância pode ser resultante do facto explicado no parágrafo anterior. Se analisarmos, por exemplo, o Gráfico 38 que contém o histograma da área de pavimento útil, verificamos que a distribuição é muito assimétrica, sendo que existe uma concentração de valores junto ao mínimo (64 m<sup>2</sup>) graças à eliminação de certos valores fora do intervalo de possibilidades o que também altera a média da variável. Este comportamento da distribuição de probabilidade propaga-se então ao longo do algoritmo, acabando por influenciar a distribuição de frequências dos parâmetros de *output* (ganhos e perdas de calor,  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ ). No entanto, a influência desta discrepância no valor final é pouco significativa pelo que se pode considerar irrelevante.

Tabela 15 - Média e desvio padrão das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, bem como os seus valores limite, resultantes da simulação e de dados recolhidos a partir de casos reais.

Parâmetro	$N_{ic}$ (simulação)	$N_{ic}$ (dados)	$N_i$ (simulação)	$N_i$ (dados)	$N_{vc}$ (simulação)	$N_{vc}$ (dados)	$N_v$ (simulação)	$N_v$ (dados)
Média (kWh/m <sup>2</sup> )	64	65	124	66	24	11	14	24
Desvio padrão (kWh/m <sup>2</sup> )	38	34	34	19	11	9	7	7

Ainda relacionado com o algoritmo, uma razão que pode levar a que o valor obtido seja diferente ao esperado é a existência de variáveis com valores desadequados para cada situação. Por exemplo, num certo ciclo em que se verifique uma temperatura média exterior ( $\theta_m$ ) baixa e um valor de radiação solar incidente ( $I_r$ ) elevado ocorre uma contradição porque, em regra geral, um  $I_r$  elevado, em Portugal, implica um Verão quente, de temperaturas altas, e um  $\theta_m$  implica o oposto. Como o  $\theta_m$  é contabilizado no cálculo das perdas de calor e  $I_r$  no cálculo dos ganhos de calor, o valor do  $N_{vc}$  resultante é relativamente alto. Esta inadequação constitui uma ambiguidade que se considera inerente ao algoritmo, por este não ser capaz de a discriminar, e que pode resultar numa média diferente do esperado, tanto para o período de aquecimento como de arrefecimento. Contudo, como isto acontece em poucos ciclos, a diferença no final é mínima pelo que se considera desprezável.

Mesmo assim, no caso da estação de arrefecimento, apesar de o valor de  $N_{vc}$  obtido ser também diferente do valor dos dados reais, a diferença entre os 24 kWh/m<sup>2</sup> obtidos e os 11 kWh/m<sup>2</sup> dos casos reais não é assim tão considerável. O valor obtido de  $N_{vc}$  é aceitável pelo que se pode afirmar que para a estação de arrefecimento, a simulação é relativamente precisa.

No caso dos valores máximos das necessidades energéticas, os resultados obtidos através da simulação apresentam uma imprecisão relativamente alta, principalmente no período de aquecimento, em que o  $N_i$  obtido (124 kWh/m<sup>2</sup>) é praticamente o dobro do verificado em casos reais (66 kWh/m<sup>2</sup>) (apesar de estes terem sido obtidos usando a metodologia do regulamento anterior – RCCTE). Esta discrepância, muito provavelmente, resulta das aproximações feitas ao cálculo das perdas de calor por transmissão, já que seria demasiado complexo diferenciar cada componente e o respectivo coeficiente de transmissão térmica onde ocorrem as perdas de calor por transmissão. No caso do período de arrefecimento, diferença verificada não é tão acentuada pelo que se considera aceitável.

No entanto, pode-se considerar a imprecisão verificada talvez como pouco relevante já que a simulação foca-se na determinação das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, além do facto o cálculo ter muitas aproximações.

As distribuições dos casos reais estão indicadas desde da Tabela 60 à Tabela 63 (do ANEXO C), sendo que estão abaixo representadas sob a forma de histograma desde do Gráfico 51 ao Gráfico 54. Apesar de estes valores serem usados como referência, estes foram obtidos a partir de uma

metodologia presente no regulamento anterior, o RCCTE. Neste regulamento, o  $N_i$  e o  $N_v$  são determinados de uma forma distinta em relação ao método usado no REH, no entanto, nesta dissertação consideram-se que ainda são úteis como referência, de modo a inferir a precisão do método a analisar.

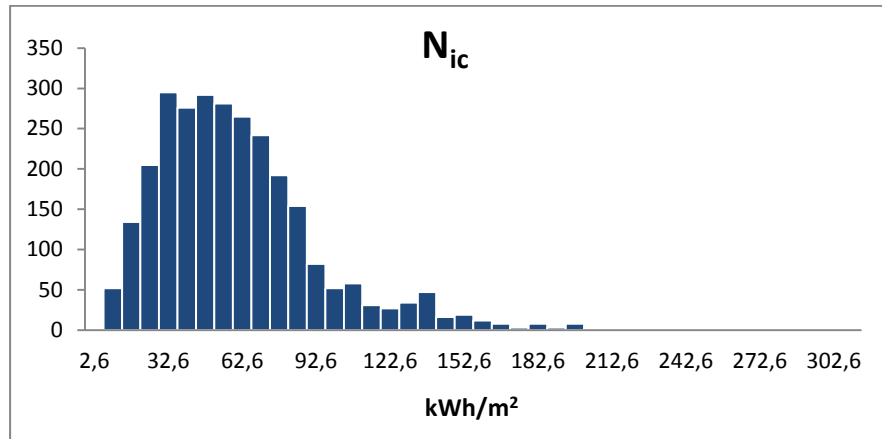


Gráfico 51 - Histograma com os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento de casos reais.

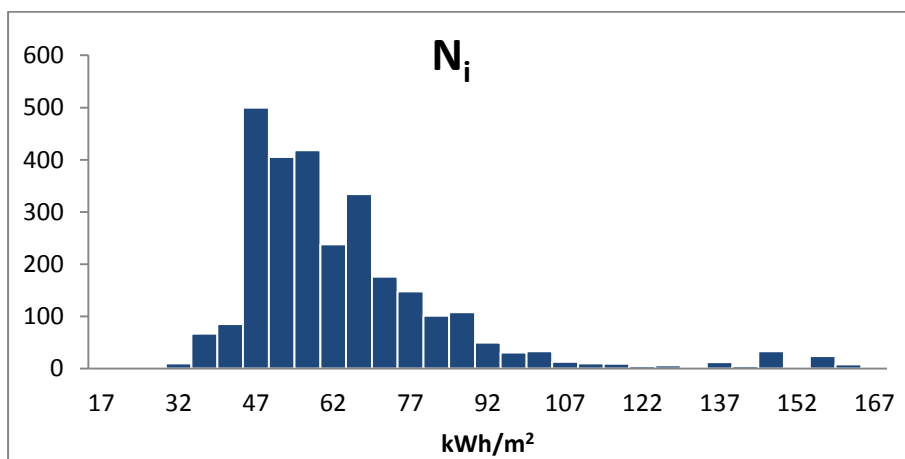


Gráfico 52 - Histograma com os valores máximos das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento de casos reais.

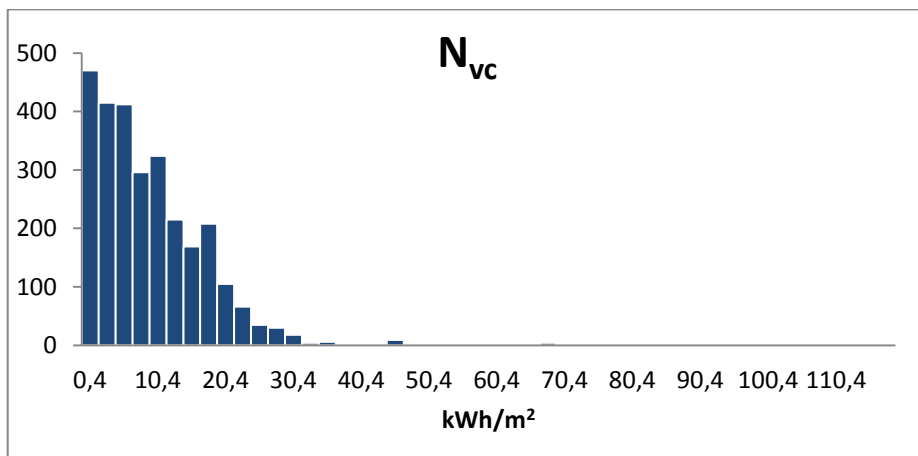


Gráfico 53 - Histograma com os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento de casos reais.

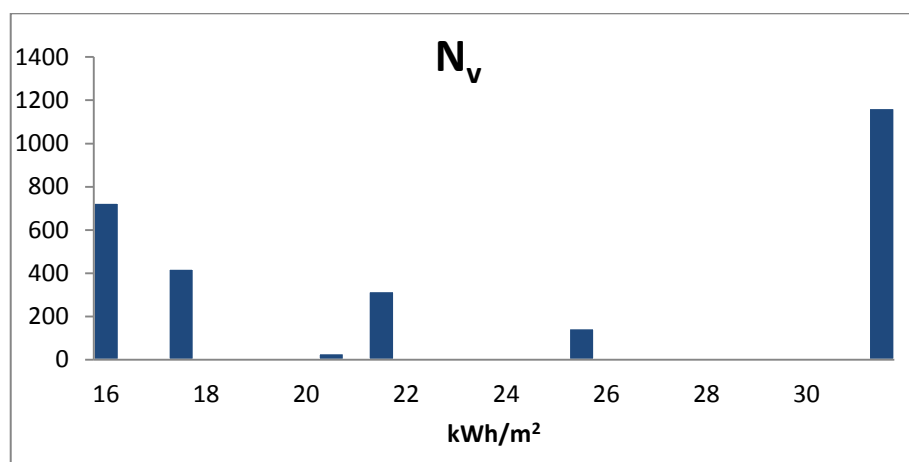


Gráfico 54 - Histograma com os valores máximos das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento de casos reais.

Os valores do Gráfico 54, relativos aos valores de referência  $N_v$  para casos reais, além de serem muito dispersos, possuem valores constantes ou bem definidos porque na metodologia antiga do RCCTE este parâmetro, dependendo da zona climática, tinha valores tabelados, pelo que a sua distribuição toma esta forma.

No que toca à simulação em si, foram estabelecidas 100000 iterações pelo que as distribuições de frequências são relativamente suaves ao contrário, por exemplo, do Gráfico 55 onde foram feitas apenas 100 iterações. Se este for comparado com o Gráfico 43 verifica-se que com 100 iterações o tipo de distribuição de probabilidades é pouco perceptível. Ainda mais, os valores da média e do desvio padrão tendem a variar mais quanto maior for o número de iterações. Assim, quanto maior for o número de iterações, mais estável será a média e o desvio padrão das distribuições.

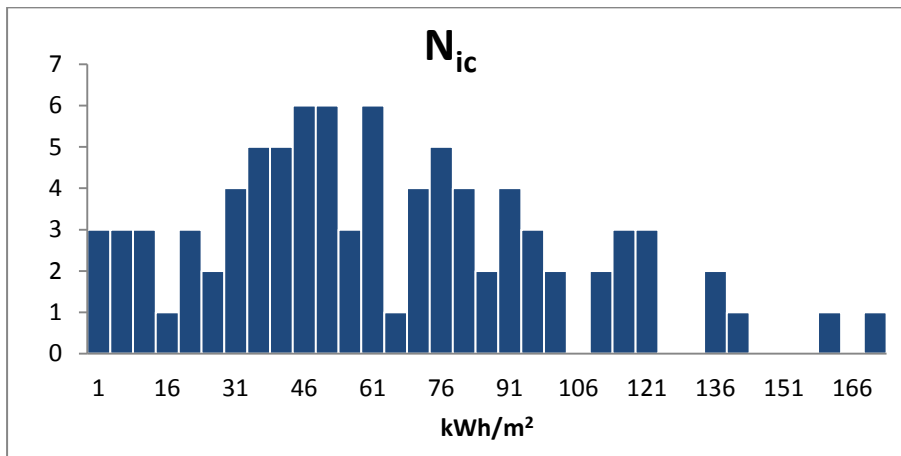


Gráfico 55 - Histograma com os valores calculados das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento para 100 iterações.

De salientar que as distribuições obtidas possuem apenas 88319 das 100000 geradas porque foram removidos certos valores os quais estão fora do intervalo das possibilidades, como explicado em 5.4.10. Isto é possível verificar nas tabelas do ANEXO C, porém nem todas distribuições possuem os 88319 valores como o supracitado, isto porque ocorre um erro, cuja razão se desconhece, durante a exportação dos valores do Matlab para Excel.

## 8. Conclusão

Num cenário em que a sustentabilidade ambiental e energética é um requisito fundamental do desenvolvimento económico de um país, as políticas económicas a aplicar necessitam de ter em conta o consumo energético em todo o território nacional. Representando o consumo energético nos edifícios fatia considerável no panorama nacional português, foram criados regulamentos legais com vista a fomentar o uso racional e eficiente da energia neste setor. No caso do consumo energético em edifícios de habitação, foi recentemente publicado o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH), onde está incluída uma metodologia que permite determinar valores nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento de habitações.

Perante a necessidade de regular o consumo energético em edifícios de habitação, torna-se necessário tipificá-lo de modo a que se conheça o consumo médio em Portugal. Para isso, podem ser aplicados métodos estatísticos que usem o cálculo presente no REH e os valores conhecidos dos parâmetros necessários a englobar. Um método bastante usado é o método de Monte Carlo que usa distribuições de probabilidade das variáveis de entrada (*input*) para obter mais distribuições probabilísticas das variáveis de saída (*output*). Neste caso, o valor que se pretende obter é o valor para o qual estas distribuições convergem, ou seja, a média do *output*.

Neste âmbito, foi usado na presente dissertação o método de Monte Carlo para realizar uma simulação cujo *output* consiste nas necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento. A simulação usa como algoritmo a metodologia do REH, havendo contudo a necessidade de, tal como está descrito no documento, haver uma especial atenção ao facto de o método necessitar de parâmetros específicos que variam ao longo das regiões e com as características do edifício, ao qual podem pertencer várias habitações.

Tendo em conta a caracterização feita quer ao clima português quer ao parque residencial em território nacional, torna-se claro que existe uma panóplia de elementos característicos que tornam a análise ao consumo energético consideravelmente complexa. Ainda mais, é necessária uma recolha minuciosa de vários dados relativos às mais variadas características que cada edifício possui, sendo que estas podem variar muito de edifício para edifício. Para a análise energética, o cálculo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, baseado na metodologia presente no REH, engloba muitos desses parâmetros e variáveis que necessitam de uma diferenciação e caracterização exaustiva. Por isso, foi necessário realizar várias simplificações e aplicar condições para que a simulação em ambiente Matlab fosse executável de modo simples e eficiente.

As necessidades médias obtidas para os períodos de aquecimento e de arrefecimento foram 64 kWh/m<sup>2</sup> e 24 kWh/m<sup>2</sup>, respetivamente. Apesar de o valor do  $N_{vc}$  obtido ser maior que a média de dados reais (11 kWh/m<sup>2</sup>) e como o  $N_{ic}$  obtido é bastante próximo da média dos dados reais (65 kWh/m<sup>2</sup>), considera-se que a simulação é precisa. No entanto, apesar do desvio padrão obtido em cada

caso, a distribuição dos resultados é assimétrica positiva, sendo que a maioria dos valores obtidos se concentram em valores inferiores à média no caso do  $N_{ic}$ .

Pode-se afirmar que é exequível usar o método de Monte Carlo numa simulação em Matlab para determinar as necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento com uma precisão razoável, aplicando simplificações e condições especiais, as quais, ajudam a tornar a simulação mais simples e eficiente a nível de execução, apesar de poderem ocorrer alterações mínimas da validade de certos valores, graças a razões como:

- **Alteração da média dos dados gerados**, como esta simulação depende da média dos dados recolhidos, o valor final não será fidedigno;
- **Distribuição assimétrica de dados**, em que os dados se concentram junto aos mínimos obtidos;
- **Desadequação de dados gerados**, ou seja, para a mesma iteração são gerados valores que muito provavelmente não ocorreriam naturalmente em simultâneo.

Porém, os resultados não passam de estimativas e o intervalo de resultados apresentam um margem de erro ou intervalo de confiança muito grande o que leva a que, por um lado, se tenham estimativas “seguras”, que englobam todos os resultados possíveis e, por outro lado, que se obtenham estimativas pouco exatas.

Ao longo da simulação é evidenciada a necessidade de realizar um grande número de iterações ou ciclos para tornar o resultado mais estável. Ora neste caso de estudo foram realizadas 100000 iterações pelo que a distribuição de frequências obtida é razoavelmente suave e estável, facto possível de verificar ao comparar o Gráfico 43 com o Gráfico 55, apesar de, quantas mais iterações a simulação tiver maior será o poder de processamento informático necessário para que esta possa ser executada. Assim, uma simulação de Monte Carlo tem a desvantagem de necessitar um nível de processamento relativamente alto para que os seus resultados sejam precisos e estáveis.

O facto de ser possível modelar um algoritmo e adaptar as variáveis de entrada, revela a flexibilidade do método ao permitir que a simulação seja “moldada” ao caso em estudo. Outra virtude do método é o facto de ter permitido escolher o tipo de distribuição probabilística das variáveis de entrada, o que resultou num intervalo de valores que possibilita uma estimativa mais segura.

Face ao mencionado anteriormente, ficam evidenciadas vantagens e desvantagens da realização de uma simulação de Monte Carlo.

Em resumo, pode-se concluir que a metodologia proposta na presente dissertação é perfeitamente aceitável e viável, já que torna os processos vigentes mais sustentáveis e, até certo ponto, não desvirtuam os resultados pretendidos, para além de não pressuporem a criação de qualquer nova estrutura ou valência para a sua implementação já que o método não carece de um aumento significativo da atual capacidade técnica tipicamente existente nas entidades envolvidas na área de



eficiência energética. Desta forma, a utilização de tais metodologias será uma importante ferramenta na tipificação do consumo energético doméstico, facilitando os estudos e aplicação de novas medidas de eficiência energética em edifícios, o que por sua vez ajuda a minimizar os impactos ambientais e económicos negativos decorrentes das necessidades energéticas dos edifícios do parque residencial.

## 9. Referências

- Corrado, V., Mechri, H., Fabrizio, E., 2007, Building energy performance assessment through simplified models: application of the ISO 13790 quasi-steady state method, Dipartimento di Energetica (DENER), Politecnico di Torino, Torino 10129, Italy.
- Eficiência Energética nos Edifícios Residenciais, EnerBuilding.eu , Lisboa, Maio 2008.
- Freitas, F., 2008, Estudo de sensibilidade dos parâmetros que influenciam a quantificação das necessidades de arrefecimento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.
- Gonçalves, H., Camelo, S., Horta, C., Brotas, L., Graça, J.M., Edifícios bioclimáticos de construção social e edifícios sociais em Portugal, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P. (INETI), Departamento de Energias Renováveis, Estrada do Paço do Lumiar. 1649-038 Lisboa. Portugal.
- Granadeiro, V., Correia, J., Leal, V., Duarte, J., Envelope related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages, Energy and Buildings 61 (2013) 215–223
- Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico 2010, INE/DGEG, Lisboa, Portugal 2011
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), (Novembro 2013), Área educativa - Clima de Portugal Continental, em <http://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/index.jsp?page=clima.pt.xml>.
- International Energy Outlook 2013, US Energy Information Administration, DOE/EIA, Julho 2013
- Levelized cost of electricity renewable energy technologies, Fraunhofer ISE. 2013.
- OpenEI, Transparent Cost Database, visitada em 21 de Maio 2014.
- Palisade Corporation (Outubro 2013), em [http://www.palisade.com/risk/monte\\_carlo\\_simulation.asp](http://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp).
- Panão, M., Rebelo, M., Camelo, S., 2013, How low should be the energy required by a nearly Zero-Energy Building? The load/generation energy balance of Mediterranean housing., Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal; Universidade de Lisboa, DEGE, Campo Grande, 1149-016 Lisboa, Portugal.
- Pedro, J.B., (2013), Habitação em Portugal: evolução tendências, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101, 1700-066 Lisboa.
- Saraiva, M.C., Análise do risco em projetos de investimento pelo método de Monte Carlo, Universidade de Aveiro, Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal.
- Teixeira, M.C., 1992, As estratégias de habitação em Portugal, 1880-1940, Análise Social, vol. XXVII (115), 1992 (1º), 65-89.
- Weather Online (Novembro, 2013), em <http://www.weatheronline.co.uk/reports/climate/Portugal.htm>.
- Weisstein, Eric W. "Monte Carlo Method." de MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/MonteCarloMethod.html>.
- Wittwer, J.W., "Monte Carlo Simulation Basics" Junho 1, 2004, <http://www.vertex42.com/ExcelArticles/mc/MonteCarloSimulation.html>.
- World Energy Outlook 2013, OECD/IEA, 2013
- Rebelo, M.P., 2012, Contributo para a definição de edifício com necessidades quase nulas de energia para aquecimento e arrefecimento: edifícios de habitação, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, DEGE.

## ANEXO A – Variáveis de entrada

Tabela 16 - Valores de referência para a estação de aquecimento (fonte: REH).

Região do país	M (meses)	GD (°C.dias)	G <sub>sul</sub> (kWh/m <sup>2</sup> ) por mês
Minho-Lima	7,2	1629	130
Alto Trás-os-Montes	7,3	2015	125
Cávado	6,8	1491	125
Ave	7,2	1653	125
Grande Porto	6,2	1250	130
Tâmega	6,7	1570	135
Douro	6,9	1764	135
Entre Douro e Vouga	6,9	1544	135
Baixo Vouga	6,3	1337	140
Baixo Mondego	6,3	1304	140
Beira Interior Norte	7,5	1924	135
Beira Interior Sul	5,4	1274	140
Cova da Beira	7,1	1687	140
Serra da Estrela	7,5	1851	135
Dão-Lafões	7,3	1702	135
Pinhal Interior Norte	6,8	1555	140
Pinhal Interior Sul	6,7	1511	145
Pinhal Litoral	6,6	1323	140
Oeste	5,6	1165	145
Médio Tejo	5,9	1330	145
Lezíria do Tejo	5,2	1135	145
Grande Lisboa	5,3	1071	150
Península de Setúbal	4,7	1045	145
Alto Alentejo	5,3	1221	145
Alentejo Central	5,3	1150	150
Alentejo Litoral	5,3	1089	150
Baixo Alentejo	5,0	1068	155
Algarve	4,8	987	155
R.A. Açores	2,9	604	110
R.A. Madeira	3,2	618	105

Tabela 17 - Valores de referência para o período de arrefecimento (fonte: REH).

Região do país	$\theta_{\text{ext},v}$ (°C)	$I_{\text{solar}}$ (kWh/m <sup>2</sup> ) acumulados de Junho a Setembro								
		0° Cobertura	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SW	90° W	90° NW
Minho-Lima	20,5	785	220	345	475	485	425	485	475	345
Alto Trás-os-Montes	21,5	790	220	345	480	485	425	485	480	345
Cávado	20,7	795	220	345	485	490	425	490	485	345
Ave	20,8	795	220	350	490	490	425	490	490	350
Grande Porto	20,9	800	220	350	490	490	425	490	490	350
Tâmega	21,4	800	220	350	490	490	425	490	490	350
Douro	22,7	805	220	350	490	490	420	490	490	350
Entre Douro e Vouga	20,6	805	220	350	490	490	425	490	490	350
Baixo Vouga	20,6	810	220	355	490	490	420	490	490	355
Baixo Mondego	20,9	825	225	360	495	495	420	495	495	360
Beira Interior Norte	21,7	820	220	355	495	500	425	500	495	355
Beira Interior Sul	25,3	830	220	360	500	495	420	495	500	360
Cova da Beira	22,5	825	225	360	495	495	425	495	495	360
Serra da Estrela	21,0	820	225	355	495	495	420	495	495	355
Dão-Lafões	21,2	815	220	355	495	490	415	490	495	355
Pinhal Interior Norte	21,2	825	220	357	500	495	420	495	500	357
Pinhal Interior Sul	22,4	830	225	360	500	500	420	500	500	360
Pinhal Litoral	20,1	830	225	360	500	495	415	495	500	360
Oeste	21,0	830	225	360	500	495	415	495	500	360
Médio Tejo	22,1	835	220	360	500	495	415	495	500	360
Lezíria do Tejo	23,1	835	225	365	500	495	410	495	500	365
Grande Lisboa	21,7	840	225	365	500	495	410	495	500	365
Península de Setúbal	22,8	845	225	365	505	495	410	495	505	365
Alto Alentejo	24,5	845	225	365	505	500	415	500	505	365
Alentejo Central	24,3	850	225	370	510	500	415	500	510	370
Alentejo Litoral	22,2	850	225	365	510	495	405	495	510	365
Baixo Alentejo	24,7	855	225	370	510	495	405	495	510	370
Algarve	23,1	865	225	375	515	500	405	500	515	375
R.A. Açores	21,3	640	195	285	375	375	235	375	375	285
R.A. Madeira	20,2	580	195	260	325	320	280	320	325	260

Tabela 18 - Valores reais da área de pavimento útil, do coeficiente de transferência de calor e do pé direito médio de casos típicos de habitações portuguesas (fonte: Panão, M., Rebelo, M., Camelo, S., 2013).

	$A_p$ (m <sup>2</sup> )	H (W/°C)	$\hat{H}_T$ W/(m <sup>2</sup> .°C)	$P_d$ (m)
Exemplo 1	64	267,52	4,18	2,85
Exemplo 2	108	266,76	2,47	2,51
Exemplo 3	68	325,72	4,79	2,8
Exemplo 4	61	131,76	2,16	2,5
Exemplo 5	94	251,92	2,68	2,41
Exemplo 6	176	623,04	3,54	2,8
Exemplo 7	72	163,44	2,27	2,3
Exemplo 8	109	172,22	1,58	2,7
Exemplo 9	233	482,31	2,07	2,91

Tabela 19 - Área de fachada ( $A_f$ ), em m<sup>2</sup>, por orientação dos casos em estudo (fonte: Gonçalves, Camelo et al. 2005).

Orientação	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Exemplo 1			13,48				15,73	
Exemplo 2	3,64		16,57		24,74	1,00	14,95	
Exemplo 3	15,87				16,29		18,68	
Exemplo 4				29,85		45,70		31,10
Exemplo 5			18,06		15,41			
Exemplo 6	3,36		13,63				19,68	
Exemplo 7	33,37		5,12		29,55		73,62	
Exemplo 8			18,90		20,98			
Exemplo 9		16,54		9,83		16,44		9,98

Tabela 20 - Área do vão envidraçado ( $A_w$ ), em m<sup>2</sup>, por orientação dos casos em estudo (fonte: Gonçalves, Camelo et al. 2005).

Orientação	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Exemplo 1			6,07				3,28	
Exemplo 2			5,45	0,45	4,16		2,12	
Exemplo 3	8,21				7,38		2,60	
Exemplo 4				10,03		0,80		8,78
Exemplo 5			3,30		1,19			
Exemplo 6			11,32				6,00	
Exemplo 7	20,25				6,48		3,55	
Exemplo 8			6,48		3,78			
Exemplo 9		5,51		2,77		5,61		2,77

Tabela 21 - Rácio entre a área do vão envidraçado e a área da fachada ( $A_w/A_f$ ) por orientação para os casos em estudo (fonte: Gonçalves, Camelo et al. 2005).

Orientação	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Exemplo 1			0,45				0,21	
Exemplo 2	0,00		0,33		0,17	0,00	0,14	
Exemplo 3	0,52				0,45		0,14	
Exemplo 4				0,34		0,02		0,28
Exemplo 5			0,18		0,08			
Exemplo 6	0,00		0,83				0,30	
Exemplo 7	0,61		0,00		0,22		0,05	
Exemplo 8			0,34		0,18			
Exemplo 9		0,33		0,28		0,34		0,28
Média	0,28	0,33	0,36	0,31	0,22	0,12	0,17	0,28
Desvio Padrão	0,33	-	0,28	0,04	0,14	0,19	0,10	0,00

Tabela 22 - Fator de orientação  $X_j$  (fonte: REH).

$X_j$	Horizontal	Octante							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
	0,89	0,27	0,33	0,56	0,84	1	0,84	0,56	0,33

Tabela 23 - Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados,  $U_{ref}$  [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ] (fonte: REH).

Portugal Continental							
Zona corrente da envolvente:		Com entrada em vigor no presente regulamento			31 de Dezembro de 2015		
		I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
em contato com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas b <sub>tr</sub> >0,7	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35	0,40	0,35	0,30
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30	0,35	0,30	0,25
em contato com outros edifícios ou espaços não úteis	Elementos opacos verticais	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70	0,60
com coeficiente de redução de perdas b <sub>tr</sub> ≤0,7	Elementos opacos horizontais	0,80	0,70	0,60	0,70	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U <sub>w</sub> )		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contato com o solo		0,50			0,50		
Regiões Autónomas							
Zona corrente da envolvente:		Com entrada em vigor no presente regulamento			31 de Dezembro de 2015		
		I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
em contato com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas b <sub>tr</sub> > 0,7	Elementos opacos verticais	0,80	0,65	0,50	0,80	0,60	0,45
	Elementos opacos horizontais	0,55	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
em contato com outros edifícios ou espaços não úteis	Elementos opacos verticais	1,60	1,50	1,40	1,50	1,40	1,30
com coeficiente de redução de perdas b <sub>tr</sub> ≤ 0,7	Elementos opacos horizontais	1,00	0,90	0,60	0,70	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U <sub>w</sub> )		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contato com o solo		0,50			0,50		

Tabela 24 - Coeficientes de transmissão térmica lineares de referência,  $\psi_{ref}$  [W/(m<sup>2</sup>.°C)] (fonte: REH).

Tipo de ligação	$\psi_{ref}$ [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
Fachada com pavimentos térreos Fachada com pavimento sobre o exterior ou local não aquecido Fachada com cobertura Fachada com pavimento a nível intermédio <sup>(1)</sup> Fachada com varanda <sup>(1)</sup>	0,50
Duas paredes verticais em ângulo saliente	0,40
Fachada com caixilharia Zona de caixa de estore	0,20

(1) Os valores apresentados dizem respeito a metade da perda originada na ligação.

Tabela 25 - Coeficiente de absorção da radiação solar,  $\alpha$  (fonte: REH)

Cor	$\alpha$
Clara (branco, creme, amarelo, laranja, vermelho-claro)	0,4
Média (vermelho-escuro, verde-claro, azul-claro)	0,5
Escuro (castanho, verde-escuro, azul-vivo, azul-escuro)	0,8



## **ANEXO B – Fatores dos ganhos solares**

### **Fator de obstrução do vão envidraçado**

O fator de obstrução da radiação solar dos vãos envidraçados ( $F_s$ ) representa a redução de radiação incidente devido ao sombreamento causado por elementos exteriores ao edifício, como outros edifícios, orografia e vegetação, e por elementos do edifício, como palas e varandas. Calcula-se de acordo com a seguinte equação:

$$F_s = F_h \cdot F_o \cdot F_f \quad (42)$$

Em que  $F_h$  é o fator de sombreamento do horizonte por obstrução exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício,  $F_o$  o fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, como palas e varandas e  $F_f$  o fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, como palas verticais.

Em nenhum dos casos, o produto  $X_j \cdot F_h \cdot F_o \cdot F_f$  poderá ser inferior a 0,27. A determinação deste fator para as superfícies opacas é opcional, sendo que a sua abordagem é a mesma que a prevista para os vãos envidraçados. Caso seja ignorado, deverá ser utilizado um fator igual a 1.

### **Fator de sombreamento do horizonte por obstrução da radiação solar**

O fator de sombreamento do horizonte  $F_h$  traduz o efeito do sombreamento provocado por obstruções exteriores ao edifício e depende do ângulo do horizonte, da latitude, da orientação, do clima local e da duração da estação. No entanto, tendo em conta estes parâmetros, pode-se considerar que na estação de arrefecimento o fator  $F_h$  tomar o valor 1.

Para efeitos do REH, este fator depende primariamente do ângulo de horizonte e da orientação do vão envidraçado. O ângulo do horizonte é basicamente o ângulo entre o plano horizontal e a reta que passa pelo centro do envidraçado e pelo mais alto da maior obstrução existente entre dois planos verticais que fazem 60° para cada lado da normal do envidraçado.

Tendo em conta o ângulo de horizonte e a orientação do vão, os valores que o fator de sombreamento  $F_h$  pode tomar são os previstos na Tabela 26,

Tabela 26 - Valores do fator de sombreamento do horizonte  $F_h$  na estação de aquecimento (fonte: REH).

Ângulo do horizonte	Portugal Continental e RAA Latitude de 39°						RAM Latitude de 33°					
	H	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S	H	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S
0°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10°	0,99	1	0,96	0,94	0,96	0,97	1	1	0,96	0,96	0,97	0,89
20°	0,95	1	0,96	0,84	0,88	0,90	0,96	1	0,91	0,87	0,90	0,93
30°	0,82	1	0,85	0,71	0,68	0,67	0,88	1	0,85	0,75	0,77	0,80
40°	0,67	1	0,81	0,61	0,52	0,50	0,71	1	0,81	0,64	0,59	0,58
50°	0,62	1	0,80	0,58	0,48	0,45	0,64	1	0,80	0,60	0,53	0,51

O ângulo de horizonte é calculado para vão envidraçado individualmente, sendo que caso não seja possível fazê-lo, por predefinição, toma o valor de 45° em ambiente urbano e 20° em edifícios isolados em ambiente rural.

### Fator de sombreamento por elementos horizontais e verticais

O sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes aos vãos envidraçados e por elementos verticais, como palas e varandas, dependem do comprimento do elemento, da latitude e do clima do local onde se encontra a fração. Os valores dos fatores de sombreamento por elementos horizontais ( $F_o$ ) e por elementos verticais ( $F_f$ ), para a estação de aquecimento e arrefecimento, estão indicados na Tabela 27 até à Tabela 30.

Tabela 27 - Valores dos fatores de sombreamento dos elementos horizontais  $F_o$  na estação de aquecimento (fonte: REH).

Ângulo do horizonte	Portugal Continental e RAA Latitude de 39°					RAM Latitude de 33°				
	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S
0°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30°	1	0,94	0,84	0,76	0,73	1	0,92	0,82	0,68	0,45
45°	1	0,90	0,74	0,63	0,59	1	0,88	0,72	0,60	0,56
60°	1	0,85	0,64	0,49	0,44	1	0,83	0,62	0,48	0,43

Tabela 28 - Valores dos fatores de sombreamento dos elementos horizontais  $F_o$  na estação de aquecimento (fonte: REH).

Ângulo do horizonte	Portugal Continental e RAA Latitude de 39°					RAM Latitude de 33°				
	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S
0°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30°	0,98	0,86	0,75	0,68	0,63	0,97	0,84	0,74	0,69	0,68
45°	0,97	0,78	0,64	0,57	0,55	0,95	0,76	0,63	0,60	0,62
60°	0,94	0,70	0,55	0,50	0,52	0,92	0,68	0,55	0,54	0,60

Tabela 29 - Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais  $F_f$  na estação de aquecimento (fonte: REH).

Posição da pala	Ângulo	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Pala à esquerda	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	1	1	0,97	0,93	0,91	0,87	0,89
	45°	1	1	1	0,95	0,88	0,86	0,80	0,84
	60°	1	1	1	0,91	0,83	0,79	0,72	0,80
Pala à direita	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	0,89	0,87	0,91	0,93	0,97	1	1
	45°	1	0,84	0,80	0,86	0,88	0,95	1	1
	60°	1	0,80	0,72	0,79	0,83	0,91	1	1

Tabela 30 - Valores dos fatores de sombreamento de elementos verticais  $F_f$  na estação de arrefecimento (fonte: REH).

Posição da pala	Ângulo	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Pala à esquerda	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	1	0,96	0,91	0,91	0,96	0,95	0,86
	45°	1	1	0,96	0,85	0,87	0,95	0,93	0,78
	60°	1	1	0,95	0,77	0,84	0,93	0,88	0,69
Pala à direita	0°	1	1	1	1	1	1	1	1
	30°	1	0,86	0,95	0,96	0,91	0,91	0,96	1
	45°	1	0,78	0,93	0,95	0,87	0,85	0,96	1
	60°	1	0,69	0,88	0,93	0,84	0,77	0,95	1

No caso de existirem palas verticais quer à direita quer à esquerda, o fator  $F_f$  toma um valor igual ao produto do fatores relativos aos ângulos provocados por cada uma das palas.

O produto  $F_o.F_f$  não pode ser superior a 0,9 de modo a contabilizar o efeito do sombreamento provocado pelo contorno do vão no próprio envidraçado.

### Fração envidraçada

Tabela 31 - Fração envidraçada (fonte: REH).

Caixilharia	$F_g$	
	Sem quadrícula	Com quadrícula
Alumínio ou aço	0,7	0,6
Madeira ou PVC	0,65	0,57
Fachada-cortina de alumínio ou aço	0,9	-

### Fator solar de vãos envidraçados

Quer na estação de aquecimento quer na estação de arrefecimento, para os ganhos térmicos pelo vão envidraçado considera-se que a incidência da radiação solar é normal à superfície do vão, sendo corrigida por um fator que traduz a variação da incidência da radiação solar,  $F_w$ .

Na estação de aquecimento, considera-se que dispositivos de proteção solar móveis estão totalmente abertos, de modo a maximizar o aproveitamento da radiação solar. Neste caso, o fator solar ( $g_i$ ) resulta de um ajuste do fator solar do vidro para uma incidência normal ( $g_{\perp,vi}$ ) com o fator de seletividade angular ( $F_{w,i}$ ), mediante a expressão:

$$g_i = g_{\perp,vi} \cdot F_{w,i} \quad (43)$$

O fator  $g_{\perp,vi}$  é normalmente fornecido pelo fabricante, mas no caso de não ser possível aceder a esta informação, os valores de  $g_{\perp,vi}$  para as várias composições típicas de vidros simples ou duplos são os da Tabela 32. No período de aquecimento,  $F_{w,i}$  toma o valor 0,9.

Tabela 32 - Fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão,  $g_{\perp,vi}$  (fonte: REH).

Composição do vidro		$g_{\perp,vi}$
Vidro Simples	Incolor 4mm	0,88
	Incolor 5mm	0,87
	Incolor 6mm	0,85
	Incolor 8mm	0,82
	Colorido na massa 4mm	0,70
	Colorido na massa 5mm	0,65
	Colorido na massa 6mm	0,60
	Colorido na massa 8mm	0,50
	Refletante incolor 4 a 8mm	0,60
	Refletante colorido na massa 4 a 5mm	0,50
	Refletante colorido na massa 6 a 8mm	0,45
	Fosco	(1)
Vidro Duplo (ext + int)	Incolor 4 a 8mm + Incolor 4mm	0,78
	Incolor 4 a 8mm + Incolor 5mm	0,75
	Colorido na massa 4mm + Incolor 4 a 8mm	0,60
	Colorido na massa 5mm + Incolor 4 a 8mm	0,55
	Colorido na massa 6mm + Incolor 4 a 8mm	0,50
	Colorido na massa 8mm + Incolor 4 a 8mm	0,45
	Refletante Incolor 4 a 8mm + Incolor 4 a 8mm	0,52
	Refletante colorido na massa 4 a 5mm + Incolor 4 a 8mm	0,40
	Refletante colorido na massa 6 a 8mm + Incolor 4 a 8mm	0,35
	Tijolo de Vidro	0,57
	Fosco	(1)

(1) - Nas situações de vidro fosco, podem ser utilizados valores fator solar correspondentes às soluções de vidro incolor de igual composição.

Na estação de arrefecimento pretende-se minimizar a incidência da radiação solar através de dispositivos de proteção solar móveis, encontrando-se ativos durante uma fração do tempo que depende da direção para a qual o vão está virado. O fator solar do vão envidraçado na estação de arrefecimento é determinado mediante a seguinte expressão:

$$g_v = F_{mv} \cdot g_T + (1 - F_{mv}) \cdot g_{Tp} \quad (44)$$

Em que  $F_{mv}$  (Tabela 33) é a fração de tempo em que os dispositivos de proteção solar móveis se encontram totalmente ativados, sendo que no caso de isso não acontecer,  $F_{mv}$  toma o valor 0;  $g_T$  é o fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar, permanentes, ou móveis totalmente ativados, e  $g_{Tp}$  é o fator solar global do envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar permanente existentes. Na ausência de dispositivos de proteção solar fixos,  $g_{Tp}$  é determinado por uma expressão análoga a (42), sendo que o fator de seletividade angular é relativo à estação de arrefecimento ( $F_{w,v}$ ) e os seus valores estão presentes na Tabela 34.

O fator solar global,  $g_T$ , de um vão envidraçado com proteções totalmente ativadas, calcula-se através da seguinte abordagem:

a) Para vidro simples:

$$g_T = g_{\perp,vi} \cdot \prod_i \frac{g_{T_{vc}}}{0,85} \quad (45)$$

b) Para vidro duplo:

$$g_T = g_{\perp,vi} \cdot \prod_i \frac{g_{T_{vc}}}{0,75} \quad (46)$$

Em que  $g_{T_{vc}}$  é o fator solar do vão envidraçado com vidro corrente e um dispositivo de proteção solar, permanente, ou móvel totalmente ativado, para uma incidência solar normal à superfície do vidro. Os seus valores estão estimados na Tabela 35.

Tabela 33 - Fração de tempo em que os dispositivos móveis se encontram ativados  $F_{mv}$ . (fonte: REH).

Orientação do vão	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S	Horizontal
$F_{mv}$	0	0,4	0,6	0,7	0,6	0,9

Tabela 34 - Fator de correção da seletividade angular dos envidraçado na estação de arrefecimento,  $F_{w,v}$  (fonte: REH).

Orientação do vão	$F_{w,v}$				
	N	NE/NW	E/W	SE/SW	S
Vidro plano simples	0,85	0,90	0,90	0,90	0,80
Vidro plano duplo	0,80	0,85	0,85	0,85	0,75

Tabela 35 - Valores correntes do fator solar dos vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar  $g_{T_{vc}}$  (fonte: REH).

Tipo de proteção		$g_{T_{vc}}$					
		Vidro Simples			Vidro Duplo		
		Clara	Média	Escura	Clara	Média	Escura
Proteções exteriores	Portada de madeira	0,04	0,07	0,9	0,03	0,05	0,06
	Persiana de réguas de madeira	0,05	0,08	0,1	0,04	0,05	0,7
	Persiana de réguas metálicas ou plásticas	0,07	0,1	0,13	0,04	0,04	0,09
	Estore veneziano de lâminas de madeira	-	0,11	-	-	0,08	-
	Estore veneziano de lâminas metálicas	-	0,14	-	-	0,09	-
	Lona opaca	0,07	0,09	0,12	0,04	0,06	0,08
	Lona pouco transparente	0,14	0,17	0,19	0,1	0,12	0,14
	Lona muito transparente	0,21	0,23	0,25	0,16	0,18	0,2
Proteções interiores	Estores de lâminas	0,45	0,56	0,65	0,47	0,59	0,69
	Cortinas opacas	0,33	0,44	0,54	0,37	0,46	0,55
	Cortinas ligeiramente transparentes	0,36	0,46	0,56	0,38	0,47	0,56
	Cortinas transparentes	0,38	0,48	0,58	0,39	0,48	0,58
	Cortinas muito transparentes	0,7	-	-	0,63	-	-
	Portadas opacas	0,3	0,4	0,5	0,35	0,46	0,58
	Persianas	0,35	0,45	0,57	0,4	0,55	0,65
	Proteção entre dois vidros: estore veneziano, lâminas delgadas	-	-	-	0,28	0,34	0,4

Para determinar se a cor da proteção é clara, média ou escura aplica-se o mesmo critério de cores da Tabela 25.





## ANEXO C – Distribuições de frequência

### Distribuições de frequências das variáveis de entrada das características do clima

Tabela 36 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da duração da estação de aquecimento.

M				
Meses	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
0,9	5	0,006%	5	0,006%
1,4	18	0,020%	23	0,026%
1,9	94	0,106%	117	0,132%
2,4	293	0,332%	410	0,464%
2,9	886	1,003%	1296	1,467%
3,4	2104	2,382%	3400	3,849%
3,9	4331	4,903%	7731	8,753%
4,4	7644	8,654%	15375	17,407%
4,9	11244	12,730%	26619	30,137%
5,4	13896	15,732%	40515	45,869%
5,9	14361	16,259%	54876	62,128%
6,4	12862	14,562%	67738	76,689%
6,9	9435	10,682%	77173	87,371%
7,4	5857	6,631%	83030	94,002%
7,9	3174	3,593%	86204	97,595%
8,4	1386	1,569%	87590	99,164%
8,9	504	0,571%	88094	99,735%
9,4	170	0,192%	88264	99,928%
9,9	46	0,052%	88310	99,980%
10,4	9	0,010%	88319	99,990%
10,9	9	0,010%	88328	100%

Tabela 37 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do número de graus dias.

GD				
°C.dias	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
604	548	0,620%	548	0,620%
654	740	0,838%	1288	1,458%
704	981	1,111%	2269	2,569%
754	1350	1,529%	3619	4,098%
804	1520	1,721%	5139	5,819%
854	1959	2,218%	7098	8,037%
904	2422	2,742%	9520	10,779%
954	2904	3,288%	12424	14,067%
1004	3375	3,821%	15799	17,889%
1054	3844	4,352%	19643	22,241%
1104	4271	4,836%	23914	27,077%
1154	4598	5,206%	28512	32,283%
1204	4876	5,521%	33388	37,804%
1254	5203	5,891%	38591	43,695%
1304	5346	6,053%	43937	49,748%
1354	5298	5,999%	49235	55,747%
1404	5283	5,982%	54518	61,729%
1454	5205	5,893%	59723	67,622%
1504	4779	5,411%	64502	73,033%
1554	4367	4,945%	68869	77,978%
1604	3979	4,505%	72848	82,483%
1654	3510	3,974%	76358	86,457%
1704	3103	3,513%	79461	89,970%
1754	2443	2,766%	81904	92,737%
1804	2121	2,402%	84025	95,138%
1854	1730	1,959%	85755	97,097%
1904	1347	1,525%	87102	98,622%
1954	1217	1,378%	88319	100%

Tabela 38 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar mensal incidente numa superfície orientada a sul.

$G_{sul}$				
kWh/ (m <sup>2</sup> .meses)	$f_i$	$f_r$	$F_{ac}$	$F_{ri}$
88	14	0,016%	14	0,016%
93	48	0,054%	62	0,070%
98	168	0,190%	230	0,260%
103	616	0,697%	846	0,958%
108	1796	2,033%	2642	2,991%
113	4118	4,662%	6760	7,653%
118	7859	8,897%	14619	16,551%
123	12277	13,899%	26896	30,450%
128	15356	17,385%	42252	47,835%
133	15684	17,756%	57936	65,591%
138	12993	14,710%	70929	80,301%
143	9094	10,296%	80023	90,597%
148	4914	5,563%	84937	96,160%
153	2196	2,486%	87133	98,646%
158	842	0,953%	87975	99,599%
163	273	0,309%	88248	99,908%
168	53	0,060%	88301	99,968%
173	18	0,020%	88319	99,989%
178	9	0,010%	88328	99,999%
183	1	0,001%	88329	100%

Tabela 39 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da temperatura exterior média durante a estação de arrefecimento.

$T_{ext}$				
°C	$f_i$	$f_r$	$F_{ac}$	$F_{ri}$
16,1	5	0,006%	5	0,006%
16,6	24	0,027%	29	0,033%
17,1	50	0,057%	79	0,089%
17,6	185	0,209%	264	0,299%
18,1	471	0,533%	735	0,832%
18,6	1065	1,206%	1800	2,038%
19,1	2306	2,610%	4106	4,648%
19,6	4087	4,626%	8193	9,274%
20,1	6481	7,336%	14674	16,610%
20,6	9008	10,197%	23682	26,807%
21,1	11381	12,883%	35063	39,690%
21,6	12459	14,103%	47522	53,793%
22,1	12029	13,616%	59551	67,410%
22,6	10294	11,652%	69845	79,062%
23,1	7713	8,731%	77558	87,793%
23,6	5128	5,805%	82686	93,598%
24,1	3015	3,413%	85701	97,010%
24,6	1515	1,715%	87216	98,725%
25,1	666	0,754%	87882	99,479%
25,6	287	0,325%	88169	99,804%
26,1	101	0,114%	88270	99,918%
26,6	34	0,038%	88304	99,957%
27,1	15	0,017%	88319	99,974%
27,6	1	0,001%	88320	99,975%
28,1	1	0,001%	88321	99,976%
28,6	12	0,014%	88333	99,990%
29,1	5	0,006%	88338	99,995%
29,6	4	0,005%	88342	100%

Tabela 40 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa cobertura.

I <sub>r</sub> Cobertura				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
544	1	0,00%	1	0,00%
554	0	0,00%	1	0,00%
564	0	0,00%	1	0,00%
574	4	0,00%	5	0,01%
584	3	0,00%	8	0,01%
594	2	0,00%	10	0,01%
604	12	0,01%	22	0,02%
614	21	0,02%	43	0,05%
624	47	0,05%	90	0,10%
634	79	0,09%	169	0,19%
644	107	0,12%	276	0,31%
654	217	0,25%	493	0,56%
664	278	0,31%	771	0,87%
674	522	0,59%	1293	1,46%
684	643	0,73%	1936	2,19%
694	990	1,12%	2926	3,31%
704	1287	1,46%	4213	4,77%
714	1750	1,98%	5963	6,75%
724	2356	2,67%	8319	9,42%
734	2893	3,28%	11212	12,69%
744	3581	4,05%	14793	16,75%
754	4214	4,77%	19007	21,52%
764	4903	5,55%	23910	27,07%
774	5360	6,07%	29270	33,14%
784	5817	6,59%	35087	39,73%
794	6037	6,84%	41124	46,56%
804	6068	6,87%	47192	53,43%
814	5961	6,75%	53153	60,18%
824	5857	6,63%	59010	66,81%
834	5513	6,24%	64523	73,05%
844	4781	5,41%	69304	78,47%
854	4290	4,86%	73594	83,32%
864	3509	3,97%	77103	87,30%
874	2888	3,27%	79991	90,57%
884	2307	2,61%	82298	93,18%
894	1726	1,95%	84024	95,13%
904	1401	1,59%	85425	96,72%
914	951	1,08%	86376	97,79%
924	673	0,76%	87049	98,56%

I <sub>r</sub> Cobertura				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
934	468	0,53%	87517	99,09%
944	296	0,34%	87813	99,42%
954	201	0,23%	88014	99,65%
964	125	0,14%	88139	99,79%
974	72	0,08%	88211	99,87%
984	45	0,05%	88256	99,92%
994	37	0,04%	88293	99,96%
1004	12	0,01%	88305	99,98%
1014	6	0,01%	88311	99,99%
1024	8	0,01%	88319	99,99%
1034	5	0,01%	88324	100%

Tabela 41 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Norte.

I <sub>r</sub> Norte				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
192,0	5	0,006%	5	0,006%
194,5	18	0,020%	23	0,026%
197,0	71	0,080%	94	0,106%
199,5	176	0,199%	270	0,306%
202,0	474	0,537%	744	0,842%
204,5	1188	1,345%	1932	2,187%
207,0	2282	2,583%	4214	4,770%
209,5	4232	4,790%	8446	9,561%
212,0	6550	7,414%	14996	16,975%
214,5	9326	10,557%	24322	27,532%
217,0	11657	13,195%	35979	40,727%
219,5	12673	14,345%	48652	55,072%
222,0	11968	13,547%	60620	68,620%
224,5	10034	11,358%	70654	79,978%
227,0	7399	8,375%	78053	88,353%
229,5	4956	5,610%	83009	93,963%
232,0	2895	3,277%	85904	97,240%
234,5	1429	1,618%	87333	98,858%
237,0	611	0,692%	87944	99,549%
239,5	257	0,291%	88201	99,840%
242,0	90	0,102%	88291	99,942%
244,5	28	0,032%	88319	99,974%
247,0	12	0,014%	88331	99,988%
249,5	4	0,005%	88335	99,992%
252,0	2	0,002%	88337	99,994%
254,5	5	0,006%	88342	100%

Tabela 42 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Nordeste.

I <sub>r</sub> Nordeste				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
256	10	0,01%	10	0,01%
266	36	0,04%	46	0,05%
276	164	0,19%	210	0,24%
286	535	0,61%	745	0,84%
296	1507	1,71%	2252	2,55%
306	3423	3,87%	5675	6,42%
316	6699	7,58%	12374	14,00%
326	10479	11,86%	22853	25,86%
336	13796	15,61%	36649	41,48%
346	15184	17,19%	51833	58,66%
356	13869	15,70%	65702	74,36%
366	10494	11,88%	76196	86,24%
376	6578	7,44%	82774	93,68%
386	3332	3,77%	86106	97,45%
396	1443	1,63%	87549	99,09%
406	568	0,64%	88117	99,73%
416	154	0,17%	88271	99,90%
426	41	0,05%	88312	99,95%
436	7	0,01%	88319	99,96%
446	32	0,04%	88351	99,99%
456	5	0,01%	88356	100%

Tabela 43 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Este.

I <sub>r</sub> Este				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
328	4	0,005%	4	0,005%
338	7	0,008%	11	0,012%
348	22	0,025%	33	0,037%
358	42	0,048%	75	0,085%
368	98	0,111%	173	0,196%
378	218	0,247%	391	0,443%
388	424	0,480%	815	0,923%
398	792	0,897%	1607	1,819%
408	1410	1,596%	3017	3,416%
418	2202	2,493%	5219	5,909%
428	3329	3,769%	8548	9,678%
438	4657	5,273%	13205	14,951%
448	6190	7,008%	19395	21,959%
458	7491	8,481%	26886	30,440%
468	8844	10,013%	35730	40,453%
478	9276	10,502%	45006	50,956%
488	9148	10,357%	54154	61,313%
498	8491	9,613%	62645	70,926%
508	7217	8,171%	69862	79,097%
518	5950	6,737%	75812	85,834%
528	4528	5,127%	80340	90,961%
538	3115	3,527%	83455	94,487%
548	2093	2,370%	85548	96,857%
558	1319	1,493%	86867	98,350%
568	724	0,820%	87591	99,170%
578	377	0,427%	87968	99,597%
588	189	0,214%	88157	99,811%
598	104	0,118%	88261	99,929%
608	34	0,038%	88295	99,967%
618	16	0,018%	88311	99,985%
628	7	0,008%	88318	99,993%
638	1	0,001%	88319	99,994%
648	5	0,006%	88324	100%

Tabela 44 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Sudeste.

I <sub>r</sub> Sudeste				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
319	2	0,002%	2	0,002%
329	2	0,002%	4	0,005%
339	13	0,015%	17	0,019%
349	22	0,025%	39	0,044%
359	48	0,054%	87	0,099%
369	123	0,139%	210	0,238%
379	254	0,288%	464	0,525%
389	500	0,566%	964	1,091%
399	939	1,063%	1903	2,155%
409	1582	1,791%	3485	3,946%
419	2515	2,848%	6000	6,794%
429	3702	4,192%	9702	10,985%
439	5335	6,041%	15037	17,026%
449	6636	7,514%	21673	24,539%
459	8214	9,300%	29887	33,840%
469	9143	10,352%	39030	44,192%
479	9516	10,775%	48546	54,967%
489	9437	10,685%	57983	65,652%
499	8353	9,458%	66336	75,110%
509	6789	7,687%	73125	82,796%
519	5333	6,038%	78458	88,835%
529	3829	4,335%	82287	93,170%
539	2559	2,897%	84846	96,068%
549	1594	1,805%	86440	97,872%
559	930	1,053%	87370	98,925%
569	510	0,577%	87880	99,503%
579	244	0,276%	88124	99,779%
589	113	0,128%	88237	99,907%
599	44	0,050%	88281	99,957%
609	22	0,025%	88303	99,982%
619	12	0,014%	88315	99,995%
629	4	0,005%	88319	100%

Tabela 45 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Sul.

I <sub>r</sub> Sul				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
232	4	0,005%	4	0,005%
242	4	0,005%	8	0,009%
252	13	0,015%	21	0,024%
262	27	0,031%	48	0,054%
272	55	0,062%	103	0,117%
282	103	0,117%	206	0,233%
292	240	0,272%	446	0,505%
302	439	0,497%	885	1,002%
312	761	0,862%	1646	1,864%
322	1294	1,465%	2940	3,329%
332	2059	2,331%	4999	5,660%
342	2876	3,256%	7875	8,916%
352	4086	4,626%	11961	13,542%
362	5364	6,073%	17325	19,616%
372	6632	7,509%	23957	27,125%
382	7530	8,526%	31487	35,650%
392	8281	9,376%	39768	45,026%
402	8590	9,726%	48358	54,752%
412	8438	9,554%	56796	64,306%
422	7517	8,511%	64313	72,817%
432	6591	7,462%	70904	80,279%
442	5357	6,065%	76261	86,344%
452	4109	4,652%	80370	90,997%
462	2899	3,282%	83269	94,279%
472	2044	2,314%	85313	96,593%
482	1294	1,465%	86607	98,058%
492	784	0,888%	87391	98,946%
502	462	0,523%	87853	99,469%
512	220	0,249%	88073	99,718%
522	121	0,137%	88194	99,855%
532	71	0,080%	88265	99,935%
542	23	0,026%	88288	99,962%
552	19	0,022%	88307	99,983%
562	7	0,008%	88314	99,991%
572	2	0,002%	88316	99,993%
582	3	0,003%	88319	99,997%
592	3	0,003%	88322	100%

Tabela 46 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Sudoeste.

I <sub>r</sub> Sudoeste				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
319	1	0,001%	1	0,001%
329	0	0,000%	1	0,001%
339	4	0,005%	5	0,006%
349	7	0,008%	12	0,014%
359	13	0,015%	25	0,028%
369	53	0,060%	78	0,088%
379	101	0,114%	179	0,203%
389	261	0,296%	440	0,498%
399	465	0,526%	905	1,025%
409	883	1,000%	1788	2,024%
419	1542	1,746%	3330	3,770%
429	2525	2,859%	5855	6,629%
439	3823	4,329%	9678	10,958%
449	5289	5,988%	14967	16,946%
459	6804	7,704%	21771	24,650%
469	8078	9,146%	29849	33,796%
479	9143	10,352%	38992	44,149%
489	9514	10,772%	48506	54,921%
499	9071	10,271%	57577	65,191%
509	8419	9,532%	65996	74,724%
519	7005	7,931%	73001	82,655%
529	5395	6,108%	78396	88,764%
539	3858	4,368%	82254	93,132%
549	2621	2,968%	84875	96,099%
559	1584	1,793%	86459	97,893%
569	921	1,043%	87380	98,936%
579	472	0,534%	87852	99,470%
589	262	0,297%	88114	99,767%
599	117	0,132%	88231	99,899%
609	54	0,061%	88285	99,960%
619	22	0,025%	88307	99,985%
629	9	0,010%	88316	99,995%
639	1	0,001%	88317	99,997%
649	1	0,001%	88318	99,998%
659	1	0,001%	88319	99,999%
669	1	0,001%	88320	100%

Tabela 47 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Oeste.

I <sub>r</sub> Oeste				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
310	1	0,001%	1	0,001%
320	0	0,000%	1	0,001%
330	0	0,000%	1	0,001%
340	9	0,010%	10	0,011%
350	24	0,027%	34	0,038%
360	68	0,077%	102	0,115%
370	118	0,134%	220	0,249%
380	237	0,268%	457	0,517%
390	493	0,558%	950	1,076%
400	899	1,018%	1849	2,094%
410	1511	1,711%	3360	3,804%
420	2513	2,845%	5873	6,650%
430	3607	4,084%	9480	10,734%
440	5067	5,737%	14547	16,471%
450	6594	7,466%	21141	23,937%
460	7734	8,757%	28875	32,694%
470	8758	9,916%	37633	42,610%
480	9309	10,540%	46942	53,150%
490	8982	10,170%	55924	63,320%
500	8345	9,449%	64269	72,768%
510	7071	8,006%	71340	80,774%
520	5631	6,376%	76971	87,150%
530	4185	4,738%	81156	91,889%
540	2873	3,253%	84029	95,142%
550	1820	2,061%	85849	97,202%
560	1214	1,375%	87063	98,577%
570	635	0,719%	87698	99,296%
580	342	0,387%	88040	99,683%
590	158	0,179%	88198	99,862%
600	73	0,083%	88271	99,945%
610	30	0,034%	88301	99,978%
620	10	0,011%	88311	99,990%
630	6	0,007%	88317	99,997%
640	2	0,002%	88319	99,999%
650	0	0,000%	88319	99,999%
660	0	0,000%	88319	99,999%
670	1	0,001%	88320	100%

Tabela 48 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da energia solar incidente numa superfície orientada a Noroeste.

I <sub>r</sub> Noroeste				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
251	2	0,002%	2	0,002%
261	12	0,014%	14	0,016%
271	60	0,068%	74	0,084%
281	271	0,307%	345	0,391%
291	749	0,848%	1094	1,239%
301	2053	2,325%	3147	3,563%
311	4470	5,061%	7617	8,624%
321	7876	8,918%	15493	17,542%
331	11835	13,400%	27328	30,942%
341	14476	16,391%	41804	47,333%
351	15260	17,278%	57064	64,611%
361	12942	14,654%	70006	79,265%
371	8893	10,069%	78899	89,334%
381	5358	6,067%	84257	95,401%
391	2565	2,904%	86822	98,305%
401	1014	1,148%	87836	99,453%
411	374	0,423%	88210	99,877%
421	83	0,094%	88293	99,971%
431	22	0,025%	88315	99,995%
441	4	0,005%	88319	100%

## Distribuições de frequências das variáveis de entrada das características do parque residencial

Tabela 49 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas da área de pavimento útil.

A <sub>p</sub>				
m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
64	2778	3,145%	2778	3,145%
69	3203	3,626%	5981	6,772%
74	3781	4,281%	9762	11,053%
79	4100	4,642%	13862	15,695%
84	4384	4,964%	18246	20,658%
89	4746	5,373%	22992	26,032%
94	4951	5,606%	27943	31,637%
99	5211	5,900%	33154	37,537%
104	5230	5,921%	38384	43,459%
109	5156	5,838%	43540	49,296%
114	5137	5,816%	48677	55,112%
119	5003	5,664%	53680	60,777%
124	4734	5,360%	58414	66,137%
129	4445	5,033%	62859	71,169%
134	3945	4,467%	66804	75,636%
139	3584	4,058%	70388	79,694%
144	3203	3,626%	73591	83,320%
149	2783	3,151%	76374	86,471%
154	2471	2,798%	78845	89,269%
159	2027	2,295%	80872	91,564%
164	1726	1,954%	82598	93,518%
169	1301	1,473%	83899	94,991%
174	1081	1,224%	84980	96,215%
179	877	0,993%	85857	97,208%
184	630	0,713%	86487	97,921%
189	506	0,573%	86993	98,494%
194	367	0,416%	87360	98,910%
199	315	0,357%	87675	99,266%
204	186	0,211%	87861	99,477%
209	151	0,171%	88012	99,648%
214	113	0,128%	88125	99,776%
219	73	0,083%	88198	99,858%
224	50	0,057%	88248	99,915%
229	23	0,026%	88271	99,941%
234	23	0,026%	88294	99,967%
239	13	0,015%	88307	99,982%
244	6	0,007%	88313	99,989%

A <sub>p</sub>				
m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
249	2	0,002%	88315	99,991%
254	2	0,002%	88317	99,993%
259	1	0,001%	88318	99,994%
264	1	0,001%	88319	99,995%
269	1	0,001%	88320	99,997%
274	1	0,001%	88321	99,998%
279	1	0,001%	88322	99,9989%

Tabela 50 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do pé direito médio da habitação.

P <sub>d</sub>				
m	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
2,3	7286	8,25%	7286	8,2%
2,4	12380	14,02%	19666	22,3%
2,5	16729	18,94%	36395	41,2%
2,6	18469	20,91%	54864	62,1%
2,7	16062	18,19%	70926	80,3%
2,8	17393	19,69%	88319	100%



Tabela 51 - - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do coeficiente global de transferência de calor.

$\dot{H}_T$				
$w/(m^2 \cdot ^\circ C)$	$f_i$	$f_r$	$F_{ac}$	$F_{Ri}$
0,0	143	0,162%	143	0,162%
0,2	265	0,300%	408	0,462%
0,4	430	0,487%	838	0,949%
0,6	727	0,823%	1565	1,772%
0,8	1013	1,147%	2578	2,919%
1,0	1548	1,753%	4126	4,671%
1,2	2142	2,425%	6268	7,097%
1,4	2773	3,140%	9041	10,236%
1,6	3575	4,048%	12616	14,284%
1,8	4443	5,030%	17059	19,314%
2,0	5353	6,061%	22412	25,375%
2,2	6066	6,868%	28478	32,243%
2,4	6646	7,525%	35124	39,767%
2,6	6983	7,906%	42107	47,673%
2,8	6958	7,878%	49065	55,551%
3,0	6812	7,713%	55877	63,264%
3,2	6346	7,185%	62223	70,449%
3,4	5721	6,477%	67944	76,926%
3,6	4975	5,633%	72919	82,559%
3,8	4137	4,684%	77056	87,242%
4,0	3274	3,707%	80330	90,949%
4,2	2510	2,842%	82840	93,791%
4,4	1843	2,087%	84683	95,878%
4,6	1331	1,507%	86014	97,385%
4,8	878	0,994%	86892	98,379%
5,0	582	0,659%	87474	99,038%
5,2	358	0,405%	87832	99,443%
5,4	219	0,248%	88051	99,691%
5,6	124	0,140%	88175	99,831%
5,8	85	0,096%	88260	99,928%
6,0	32	0,036%	88292	99,964%
6,2	11	0,012%	88303	99,976%
6,4	8	0,009%	88311	99,985%
6,6	3	0,003%	88314	99,989%
6,8	5	0,006%	88319	99,994%
7,0	1	0,001%	88320	99,995%
7,2	3	0,003%	88323	99,999%
7,4	0	0,000%	88323	99,999%
7,6	1	0,001%	88324	100%

## Distribuições de frequências das variáveis de saída da estação de aquecimento

Tabela 52 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das perdas de calor na estação de aquecimento.

Perdas <sub>i</sub>				
kWh	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
0	299	0,339%	299	0,339%
1000	736	0,833%	1035	1,172%
2000	1710	1,936%	2745	3,108%
3000	3010	3,408%	5755	6,516%
4000	4472	5,063%	10227	11,579%
5000	5961	6,749%	16188	18,328%
6000	6654	7,534%	22842	25,862%
7000	7188	8,138%	30030	34,000%
8000	7321	8,289%	37351	42,289%
9000	6909	7,822%	44260	50,112%
10000	6469	7,324%	50729	57,436%
11000	5926	6,709%	56655	64,145%
12000	5342	6,048%	61997	70,193%
13000	4515	5,112%	66512	75,305%
14000	3872	4,384%	70384	79,689%
15000	3267	3,699%	73651	83,388%
16000	2757	3,121%	76408	86,510%
17000	2393	2,709%	78801	89,219%
18000	1822	2,063%	80623	91,282%
19000	1594	1,805%	82217	93,087%
20000	1234	1,397%	83451	94,484%
21000	1040	1,177%	84491	95,661%
22000	785	0,889%	85276	96,550%
23000	655	0,742%	85931	97,292%
24000	535	0,606%	86466	97,897%
25000	372	0,421%	86838	98,319%
26000	331	0,375%	87169	98,693%
27000	248	0,281%	87417	98,974%
28000	210	0,238%	87627	99,212%
29000	162	0,183%	87789	99,395%
30000	116	0,131%	87905	99,527%
31000	81	0,092%	87986	99,618%
32000	79	0,089%	88065	99,708%
33000	60	0,068%	88125	99,776%
34000	40	0,045%	88165	99,821%
35000	35	0,040%	88200	99,861%
36000	33	0,037%	88233	99,898%
37000	24	0,027%	88257	99,925%
38000	17	0,019%	88274	99,945%
39000	5	0,006%	88279	99,950%
40000	10	0,011%	88289	99,962%
41000	6	0,007%	88295	99,968%
42000	2	0,002%	88297	99,971%

Perdas <sub>i</sub>				
kWh	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
43000	10	0,011%	88307	99,982%
44000	3	0,003%	88310	99,985%
45000	5	0,006%	88315	99,991%
46000	0	0,000%	88315	99,991%
47000	2	0,002%	88317	99,993%
48000	1	0,001%	88318	99,994%
49000	1	0,001%	88319	99,995%
50000	0	0,000%	88319	99,995%
51000	0	0,000%	88319	99,995%
52000	0	0,000%	88319	99,995%
53000	1	0,001%	88320	99,997%
54000	1	0,001%	88321	99,998%
55000	0	0,000%	88321	99,998%
56000	0	0,000%	88321	99,998%
57000	0	0,000%	88321	99,998%
58000	0	0,000%	88321	99,998%
59000	0	0,000%	88321	99,998%
60000	1	0,001%	88322	99,999%
61000	0	0,000%	88322	99,999%
62000	0	0,000%	88322	99,999%
63000	0	0,000%	88322	99,999%
64000	0	0,000%	88322	99,999%
65000	0	0,000%	88322	99,999%
66000	1	0,001%	88323	100,000%

Tabela 53 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos ganhos de calor na estação de aquecimento.

Ganhos <sub>i</sub>				
kWh	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
0	120	0,136%	120	0,136%
500	498	0,564%	618	0,700%
1000	3218	3,644%	3836	4,343%
1500	8341	9,444%	12177	13,788%
2000	12803	14,496%	24980	28,284%
2500	14549	16,473%	39529	44,757%
3000	13574	15,369%	53103	60,126%
3500	10784	12,210%	63887	72,337%
4000	8058	9,124%	71945	81,460%
4500	5618	6,361%	77563	87,821%
5000	3693	4,181%	81256	92,003%
5500	2454	2,779%	83710	94,781%
6000	1624	1,839%	85334	96,620%
6500	1070	1,212%	86404	97,832%
7000	714	0,808%	87118	98,640%
7500	468	0,530%	87586	99,170%
8000	278	0,315%	87864	99,485%
8500	221	0,250%	88085	99,735%
9000	105	0,119%	88190	99,854%
9500	54	0,061%	88244	99,915%
10000	39	0,044%	88283	99,959%
10500	16	0,018%	88299	99,977%
11000	10	0,011%	88309	99,989%
11500	4	0,005%	88313	99,993%
12000	4	0,005%	88317	99,998%
12500	2	0,002%	88319	100%

Tabela 54 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para aquecimento.

N <sub>ic</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
0	1981	2,243%	1981	2,243%
5	2207	2,499%	4188	4,742%
10	2559	2,897%	6747	7,639%
15	3113	3,525%	9860	11,164%
20	3635	4,116%	13495	15,279%
25	3967	4,492%	17462	19,771%
30	4305	4,874%	21767	24,645%
35	4489	5,083%	26256	29,728%
40	4630	5,242%	30886	34,970%
45	4723	5,348%	35609	40,318%
50	4736	5,362%	40345	45,680%
55	4566	5,170%	44911	50,850%
60	4376	4,955%	49287	55,804%
65	4226	4,785%	53513	60,589%
70	3980	4,506%	57493	65,096%
75	3720	4,212%	61213	69,307%
80	3491	3,953%	64704	73,260%
85	3175	3,595%	67879	76,855%
90	2887	3,269%	70766	80,124%
95	2594	2,937%	73360	83,061%
100	2232	2,527%	75592	85,588%
105	2006	2,271%	77598	87,859%
110	1736	1,966%	79334	89,825%
115	1534	1,737%	80868	91,561%
120	1286	1,456%	82154	93,018%
125	1063	1,204%	83217	94,221%
130	923	1,045%	84140	95,266%
135	812	0,919%	84952	96,186%
140	689	0,780%	85641	96,966%
145	520	0,589%	86161	97,554%
150	460	0,521%	86621	98,075%
155	350	0,396%	86971	98,471%
160	325	0,368%	87296	98,839%
165	244	0,276%	87540	99,116%
170	177	0,200%	87717	99,316%
175	140	0,159%	87857	99,475%
180	109	0,123%	87966	99,598%
185	96	0,109%	88062	99,707%
190	69	0,078%	88131	99,785%
195	34	0,038%	88165	99,823%
200	48	0,054%	88213	99,878%

N <sub>ic</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
205	30	0,034%	88243	99,912%
210	26	0,029%	88269	99,941%
215	17	0,019%	88286	99,960%
220	10	0,011%	88296	99,972%
225	8	0,009%	88304	99,981%
230	5	0,006%	88309	99,986%
235	4	0,005%	88313	99,991%
240	1	0,001%	88314	99,992%
245	3	0,003%	88317	99,995%
250	0	0,000%	88317	99,995%
255	0	0,000%	88317	99,995%
260	2	0,002%	88319	99,998%
265	0	0,000%	88319	99,998%
270	0	0,000%	88319	99,998%
275	0	0,000%	88319	99,998%
280	0	0,000%	88319	99,998%
285	1	0,001%	88320	99,999%
290	0	0,000%	88320	99,999%
295	0	0,000%	88320	99,999%
300	0	0,000%	88320	99,999%
305	0	0,000%	88320	99,999%
310	1	0,001%	88321	100%

N <sub>i</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
174	2988	3,379%	85069	96,188%
184	1725	1,950%	86794	98,139%
194	813	0,919%	87607	99,058%
204	342	0,387%	87949	99,445%
214	129	0,146%	88078	99,591%
224	37	0,042%	88115	99,633%
234	7	0,008%	88122	99,640%
244	2	0,002%	88124	99,643%
254	150	0,170%	88274	99,812%
264	73	0,083%	88347	99,895%
274	42	0,047%	88389	99,942%
284	19	0,021%	88408	99,964%
294	15	0,017%	88423	99,981%
304	9	0,010%	88432	99,991%
314	3	0,003%	88435	99,994%
324	2	0,002%	88437	99,997%
334	3	0,003%	88440	100,000%

Tabela 55 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do valor limite das necessidades de energia útil para aquecimento.

N <sub>i</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
34	62	0,070%	62	0,070%
44	663	0,750%	725	0,820%
54	1718	1,943%	2443	2,762%
64	3059	3,459%	5502	6,221%
74	4419	4,997%	9921	11,218%
84	6200	7,010%	16121	18,228%
94	8044	9,095%	24165	27,324%
104	9363	10,587%	33528	37,910%
114	10280	11,624%	43808	49,534%
124	10320	11,669%	54128	61,203%
134	9002	10,179%	63130	71,382%
144	8019	9,067%	71149	80,449%
154	6211	7,023%	77360	87,472%
164	4721	5,338%	82081	92,810%

## Distribuições de frequências das variáveis de saída da estação de arrefecimento

Tabela 56 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das perdas de calor na estação de arrefecimento.

Perdas <sub>v</sub>				
kWh	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
-4311	5	0,006%	5	0,006%
-3311	14	0,016%	19	0,022%
-2311	69	0,078%	88	0,100%
-1311	522	0,591%	610	0,691%
-311	5801	6,568%	6411	7,259%
689	17345	19,639%	23756	26,898%
1689	20583	23,305%	44339	50,203%
2689	16487	18,668%	60826	68,871%
3689	11338	12,838%	72164	81,708%
4689	7038	7,969%	79202	89,677%
5689	4038	4,572%	83240	94,249%
6689	2324	2,631%	85564	96,881%
7689	1249	1,414%	86813	98,295%
8689	713	0,807%	87526	99,102%
9689	394	0,446%	87920	99,548%
10689	167	0,189%	88087	99,737%
11689	95	0,108%	88182	99,845%
12689	63	0,071%	88245	99,916%
13689	34	0,038%	88279	99,955%
14689	18	0,020%	88297	99,975%
15689	13	0,015%	88310	99,990%
16689	4	0,005%	88314	99,994%
17689	2	0,002%	88316	99,997%
18689	2	0,002%	88318	99,999%
19689	0	0,000%	88318	99,999%
20689	0	0,000%	88318	99,999%
21689	0	0,000%	88318	99,999%
22689	0	0,000%	88318	99,999%
23689	1	0,001%	88319	100%

Tabela 57 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos ganhos de calor na estação de arrefecimento.

Ganhos <sub>v</sub>				
kWh	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
2360	663	0,751%	663	0,75%
2860	3868	4,380%	4531	5,13%
3360	8518	9,645%	13049	14,77%
3860	12055	13,649%	25104	28,42%
4360	13670	15,478%	38774	43,90%
4860	14132	16,001%	52906	59,90%
5360	11756	13,311%	64662	73,21%
5860	8497	9,621%	73159	82,83%
6360	5730	6,488%	78889	89,32%
6860	3508	3,972%	82397	93,29%
7360	2418	2,738%	84815	96,03%
7860	1512	1,712%	86327	97,74%
8360	1005	1,138%	87332	98,88%
8860	560	0,634%	87892	99,52%
9360	236	0,267%	88128	99,78%
9860	126	0,143%	88254	99,93%
10360	46	0,052%	88300	99,98%
10860	13	0,015%	88313	99,99%
11360	6	0,007%	88319	100%

Tabela 58 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento.

N <sub>vc</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
0	162	0,183%	162	0,183%
2	919	1,041%	1081	1,224%
4	2047	2,318%	3128	3,542%
6	3063	3,468%	6191	7,010%
8	4079	4,618%	10270	11,628%
10	4898	5,546%	15168	17,174%
12	5424	6,141%	20592	23,315%
14	5810	6,578%	26402	29,893%
16	6080	6,884%	32482	36,777%
18	6252	7,079%	38734	43,855%
20	5905	6,686%	44639	50,541%
22	5867	6,643%	50506	57,184%
24	5522	6,252%	56028	63,436%
26	5209	5,898%	61237	69,334%
28	4716	5,340%	65953	74,673%
30	4370	4,948%	70323	79,621%
32	3755	4,251%	74078	83,873%
34	3288	3,723%	77366	87,595%
36	2701	3,058%	80067	90,654%
38	2183	2,472%	82250	93,125%
40	1745	1,976%	83995	95,101%
42	1292	1,463%	85287	96,564%
44	951	1,077%	86238	97,640%
46	689	0,780%	86927	98,421%
48	465	0,526%	87392	98,947%
50	326	0,369%	87718	99,316%
52	222	0,251%	87940	99,567%
54	136	0,154%	88076	99,721%
56	95	0,108%	88171	99,829%
58	47	0,053%	88218	99,882%
60	29	0,033%	88247	99,915%
62	24	0,027%	88271	99,942%
64	20	0,023%	88291	99,965%
66	8	0,009%	88299	99,974%
68	4	0,005%	88303	99,978%
70	4	0,005%	88307	99,983%
72	8	0,009%	88315	99,992%
74	1	0,001%	88316	99,993%
76	3	0,003%	88319	99,997%
78	0	0,000%	88319	99,997%
80	2	0,002%	88321	99,999%
82	1	0,001%	88322	100%

Tabela 59 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas do valor limite das necessidades de energia útil para arrefecimento.

N <sub>v</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>Ri</sub>
0	40	0,045%	40	0,045%
1,5	322	0,365%	362	0,411%
3	1335	1,515%	1697	1,926%
4,5	3593	4,077%	5290	6,003%
6	6617	7,509%	11907	13,511%
7,5	9337	10,595%	21244	24,107%
9	10571	11,995%	31815	36,102%
10,5	10339	11,732%	42154	47,834%
12	9452	10,726%	51606	58,560%
13,5	7940	9,010%	59546	67,570%
15	6358	7,215%	65904	74,785%
16,5	4795	5,441%	70699	80,226%
18	3749	4,254%	74448	84,480%
19,5	2812	3,191%	77260	87,671%
21	2058	2,335%	79318	90,006%
22,5	1580	1,793%	80898	91,799%
24	1032	1,171%	81930	92,970%
25,5	726	0,824%	82656	93,794%
27	1088	1,235%	83744	95,029%
28,5	1473	1,671%	85217	96,700%
30	1185	1,345%	86402	98,045%
31,5	489	0,555%	86891	98,600%
33	168	0,191%	87059	98,790%
34,5	201	0,228%	87260	99,018%
36	275	0,312%	87535	99,330%
37,5	288	0,327%	87823	99,657%
39	187	0,212%	88010	99,870%
40,5	82	0,093%	88092	99,963%
42	24	0,027%	88116	99,990%
43,5	8	0,009%	88124	99,999%
45	1	0,001%	88125	100,000%

## Distribuições de frequências das variáveis de saída de casos reais

Tabela 60 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para aquecimento de casos reais.

N <sub>ic</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
2,6	1	0,04%	1	0,04%
10,1	52	1,85%	53	1,89%
17,6	134	4,78%	187	6,67%
25,1	205	7,31%	392	13,98%
32,6	295	10,52%	687	24,50%
40,1	276	9,84%	963	34,34%
47,6	292	10,41%	1255	44,76%
55,1	281	10,02%	1536	54,78%
62,6	265	9,45%	1801	64,23%
70,1	242	8,63%	2043	72,86%
77,6	192	6,85%	2235	79,71%
85,1	154	5,49%	2389	85,20%
92,6	82	2,92%	2471	88,12%
100,1	52	1,85%	2523	89,98%
107,6	58	2,07%	2581	92,05%
115,1	31	1,11%	2612	93,15%
122,6	27	0,96%	2639	94,12%
130,1	34	1,21%	2673	95,33%
137,6	47	1,68%	2720	97,00%
145,1	16	0,57%	2736	97,57%
152,6	19	0,68%	2755	98,25%
160,1	12	0,43%	2767	98,68%
167,6	8	0,29%	2775	98,97%
175,1	3	0,11%	2778	99,07%
182,6	8	0,29%	2786	99,36%
190,1	3	0,11%	2789	99,47%
197,6	8	0,29%	2797	99,75%
205,1	1	0,04%	2798	99,79%
212,6	2	0,07%	2800	99,86%
220,1	1	0,04%	2801	99,89%
227,6	0	0,00%	2801	99,89%
235,1	0	0,00%	2801	99,89%
242,6	1	0,04%	2802	99,93%
250,1	0	0,00%	2802	99,93%
257,6	0	0,00%	2802	99,93%
265,1	0	0,00%	2802	99,93%
272,6	0	0,00%	2802	99,93%
280,1	0	0,00%	2802	99,93%
287,6	0	0,00%	2802	99,93%
295,1	0	0,00%	2802	99,93%
302,6	0	0,00%	2802	99,93%
310,1	2	0,07%	2804	100,00%

Tabela 61 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos valores limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento de casos reais.

N <sub>i</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
17	1	0,04%	1	0,04%
22	0	0,00%	1	0,04%
27	0	0,00%	1	0,04%
32	10	0,35%	11	0,39%
37	67	2,36%	78	2,75%
42	85	3,00%	163	5,75%
47	500	17,62%	663	23,37%
52	405	14,28%	1068	37,65%
57	418	14,73%	1486	52,38%
62	238	8,39%	1724	60,77%
67	334	11,77%	2058	72,54%
72	176	6,20%	2234	78,75%
77	148	5,22%	2382	83,96%
82	101	3,56%	2483	87,52%
87	108	3,81%	2591	91,33%
92	50	1,76%	2641	93,09%
97	31	1,09%	2672	94,18%
102	33	1,16%	2705	95,35%
107	13	0,46%	2718	95,81%
112	10	0,35%	2728	96,16%
117	9	0,32%	2737	96,48%
122	5	0,18%	2742	96,65%
127	6	0,21%	2748	96,86%
132	3	0,11%	2751	96,97%
137	12	0,42%	2763	97,39%
142	5	0,18%	2768	97,57%
147	33	1,16%	2801	98,73%
152	3	0,11%	2804	98,84%
157	24	0,85%	2828	99,68%
162	8	0,28%	2836	99,96%
167	1	0,04%	2837	100,00%

Tabela 62 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de casos reais.

N <sub>vc</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
0,4	470	16,76%	470	16,76%
2,9	415	14,80%	885	31,56%
5,4	412	14,69%	1297	46,26%
7,9	296	10,56%	1593	56,81%
10,4	324	11,55%	1917	68,37%
12,9	215	7,67%	2132	76,03%
15,4	169	6,03%	2301	82,06%
17,9	208	7,42%	2509	89,48%
20,4	105	3,74%	2614	93,22%
22,9	66	2,35%	2680	95,58%
25,4	35	1,25%	2715	96,83%
27,9	30	1,07%	2745	97,90%
30,4	18	0,64%	2763	98,54%
32,9	4	0,14%	2767	98,68%
35,4	6	0,21%	2773	98,89%
37,9	3	0,11%	2776	99,00%
40,4	2	0,07%	2778	99,07%
42,9	2	0,07%	2780	99,14%
45,4	9	0,32%	2789	99,47%
47,9	1	0,04%	2790	99,50%
50,4	3	0,11%	2793	99,61%
52,9	1	0,04%	2794	99,64%
55,4	0	0,00%	2794	99,64%
57,9	0	0,00%	2794	99,64%
60,4	0	0,00%	2794	99,64%
62,9	0	0,00%	2794	99,64%
65,4	1	0,04%	2795	99,68%
67,9	4	0,14%	2799	99,82%
70,4	0	0,00%	2799	99,82%
72,9	0	0,00%	2799	99,82%
75,4	0	0,00%	2799	99,82%
77,9	0	0,00%	2799	99,82%
80,4	0	0,00%	2799	99,82%
82,9	0	0,00%	2799	99,82%
85,4	2	0,07%	2801	99,89%
87,9	0	0,00%	2801	99,89%
90,4	0	0,00%	2801	99,89%
92,9	0	0,00%	2801	99,89%
95,4	0	0,00%	2801	99,89%
97,9	0	0,00%	2801	99,89%
100,4	0	0,00%	2801	99,89%
102,9	0	0,00%	2801	99,89%
105,4	2	0,07%	2803	99,96%
107,9	0	0,00%	2803	99,96%
110,4	0	0,00%	2803	99,96%
112,9	0	0,00%	2803	99,96%
115,4	0	0,00%	2803	99,96%
117,9	1	0,04%	2804	100,00%

Tabela 63 - Distribuição de frequências absolutas, relativas e acumuladas dos valores limite das necessidades nominais de energia útil para arrefecimento de casos reais.

N <sub>v</sub>				
kWh/m <sup>2</sup>	f <sub>i</sub>	f <sub>r</sub>	F <sub>ac</sub>	F <sub>ri</sub>
16	726	25,89%	726	25,89%
16,5	0	0,00%	726	25,9%
17	0	0,00%	726	25,9%
17,5	421	15,01%	1147	40,9%
18	0	0,00%	1147	40,9%
18,5	0	0,00%	1147	40,9%
19	0	0,00%	1147	40,9%
19,5	0	0,00%	1147	40,9%
20	0	0,00%	1147	40,9%
20,5	30	1,07%	1177	42,0%
21	0	0,00%	1177	42,0%
21,5	316	11,27%	1493	53,2%
22	0	0,00%	1493	53,2%
22,5	2	0,07%	1495	53,3%
23	0	0,00%	1495	53,3%
23,5	0	0,00%	1495	53,3%
24	0	0,00%	1495	53,3%
24,5	0	0,00%	1495	53,3%
25	0	0,00%	1495	53,3%
25,5	145	5,17%	1640	58,5%
26	0	0,00%	1640	58,5%
26,5	0	0,00%	1640	58,5%
27	0	0,00%	1640	58,5%
27,5	0	0,00%	1640	58,5%
28	0	0,00%	1640	58,5%
28,5	0	0,00%	1640	58,5%
29	0	0,00%	1640	58,5%
29,5	0	0,00%	1640	58,5%
30	0	0,00%	1640	58,5%
30,5	0	0,00%	1640	58,5%
31	0	0,00%	1640	58,5%
31,5	1164	41,51%	2804	100,0%



De notar que o total das frequências absolutas acumuladas de todas as tabelas não é 100000, como seria de esperar, já que a simulação tem 100000 iterações. Isto resulta da aplicação da condição explicada em 5.4.10, ou seja, dos 100000 valores, foram removidos aqueles que estão fora do intervalo das possibilidades, sendo que o número total passa a ser, neste caso, 88319. Porém, nem todas as distribuições têm 88319 valores graças a um defeito da exportação dos valores do Matlab para Excel.

No caso das tabelas com as distribuições dos casos reais, de notar que estes valores foram determinados segundo a metodologia antiga, o RCCTE.